

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

**Desenvolvimento de um sistema hidráulico-mecânico para o
acionamento sequenciado da irrigação por aspersão em malha**

Vanessa de Fátima Grah

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

**Piracicaba
2011**

Vanessa de Fátima Grah
Engenheiro Agrônomo

**Desenvolvimento de um sistema hidráulico-mecânico para o acionamento
sequenciado da irrigação por aspersão em malha**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010

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

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

**Piracicaba
2011**

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

Grah, Vanessa de Fátima

Desenvolvimento de um sistema hidráulico-mecânico para o acionamento sequenciado da irrigação por aspersão em malha / Vanessa de Fátima Grah. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010. - - Piracicaba, 2011.

67 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.
Bibliografia.

1. Aspersores 2. Custo econômico 3. Inovações tecnológicas 4. Irrigação por aspersão - Automação I. Título

CDD 631.7
G738d

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

Ao Deus todo Poderoso, responsável por minhas vitórias

(Ofereço)

Aos meus pais Valter e Claudete, e meus irmãos Júnior e Bruno,
O amor dedicado pela família supera qualquer distância e saudade de estar junto deles

(Dedico)

AGRADECIMENTOS

Em especial a minha cunhada Gracieli e o sobrinho Ramon pessoas tão especiais, com seu carinho e presença, me motivaram nesse trabalho. A minha “Vó Maricha” com seus 95 anos de experiência e seus conselhos tão valiosos nunca deixou que eu desistisse dos meus sonhos, ao “Vô Lino” (*in memoriam*) que nos deixou a maior herança que um homem pode oferecer, seu caráter íntegro e sua alegria de viver. A todos meus familiares as minhas tias tão queridas, aos tios, primos e primas sempre atenciosos, meu avô Antônio e minha avó “Noca” (*in memoriam*), que superando a distância, me apoiarem e incentivaram.

Ao orientador professor Dr. Tarlei Arriel Botrel, por todos os ensinamentos transmitidos durante esses meses, por sua paciência e compreensão. Aos professores Dr. Olívio José Soccol e Mario Nestor Ullmann que de alguma forma me incentivaram durante o período da graduação, para que escolhesse a área da irrigação dentre tantas possibilidades que o curso de agronomia apresentava. Aos professores da graduação e pós-graduação, profissionais de suma importância na minha vida acadêmica que por meio dos seus conhecimentos despertaram a vontade de seguir a carreira docente.

Aos amigos que fiz em Piracicaba, agradeço por seu apoio e carinho: Dinara, Marinaldo, Conan, Leonardo, Alexssandro, Ana Paula, Antônio, Wanderley; essas pessoas são para mim, como uma família. Ao casal de amigos Lucas e Alice que sempre tão atenciosos, me ajudaram a enfrentar as dificuldades e a compartilhar as alegrias. Aos colegas da pós-graduação que compartilharam tantas experiências e ajudaram no crescimento profissional. Ao querido Isaac, que me proporcionou tantos momentos de alegria durante essa caminhada. Agradeço por todo incentivo, companheirismo e dedicação para tornar a ausência da família o mais suave possível.

A todos meus amigos que de alguma maneira me incentivaram, enfrentaram e partilharam dificuldades e alegrias comigo: meus amigos de Santo Amaro da Imperatriz, minha cidade natal; colegas do curso de agronomia e veterinária da UDESC - Lages; grandes amigos e companheiros do Alojamento da EMBRAPA-CPAC.

Tenho certeza, que esse trabalho, ou “sonho realizado” como gosto de chamar, só pode ser possível devido a todas essas pessoas que contribuíram de alguma forma,

mesmo que com pequenas ações, mas que me ajudaram a crescer e chegar ao fim de mais uma etapa. São todos presentes que meu bom Deus colocou em minha vida, e que fizeram valer à pena cada momento dessa caminhada. Meus sinceros agradecimentos a todos...

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela acolhida e ao curso de pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela oportunidade concedida para realização deste trabalho. Aos funcionários que sempre me apoiaram na pesquisa.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

Conheçamos, e prossigamos em conhecer ao Senhor; como a alva será sua saída; e ele a nós virá como a chuva, como a chuva serôdia que rega a terra.

Oséias 6:3

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Cenário da agricultura irrigada no Brasil	19
2.2 Irrigação por aspersão.....	20
2.2.1 Aspersão em malha.....	22
2.3 Automação na irrigação.....	26
2.4 Automação da irrigação por dispositivos hidráulico-mecânicos	29
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Fundamentações prática do projeto	35
3.2 Construção da válvula de três vias.....	37
3.2.1 Protótipo 1 da válvula de 3 vias.....	39
3.2.2 Protótipo 2 da válvula de 3 vias.....	40
3.2.3 Protótipo 3 da válvula de 3 vias.....	41
3.3 Sistema de acionamento do êmbolo da válvula de 3 vias	42
3.3.1 Protótipo 1 do sistema de acionamento do êmbolo.....	42
3.3.2 Protótipo 2 do sistema de acionamento do êmbolo.....	43
3.3.3 Protótipo 3 do sistema de acionamento do êmbolo.....	44
3.3.4 Protótipo 4 do sistema de acionamento do êmbolo.....	45
3.3.5 Protótipo 5 do sistema de acionamento do êmbolo.....	46
3.4 Temporizador	48
3.5 Aplicação do sistema de sequenciamento hidráulico-mecânico para aspersão em malha.....	49
3.6 Testes de avaliação do sistema de acionamento automático dos aspersores.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
5 CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS.....	63

RESUMO

Desenvolvimento de um sistema hidráulico-mecânico para o acionamento sequenciado da irrigação por aspersão em malha

A irrigação por aspersão em malha está inserida nos conceitos da nova agricultura irrigada, pois se trata de um sistema simples e efetivo, com custo altamente competitivo, de fácil implantação e baixo consumo de energia elétrica, quando comparado a outros sistemas de irrigação. Este sistema foi desenvolvido para irrigar pastagens, no entanto, atualmente, está sendo expandida para outras áreas, tais como café. No Brasil a automação de sistemas de irrigação vem sendo implantada com maior intensidade nos últimos anos, principalmente em função do surgimento de técnicas apropriadas que acompanha a modernização crescente da agricultura e abertura do mercado brasileiro às importações. A automação se faz necessária não somente pela possibilidade de redução dos custos com mão de obra, mas principalmente por necessidades operacionais, tais como irrigação de grandes áreas no período noturno. O trabalho teve por objetivo desenvolver e avaliar um dispositivo hidráulico-mecânico para sequenciamento automático da aspersão em malha, para facilitar o manejo do sistema de irrigação de maneira a reduzir as despesas com mão de obra e energia elétrica. Os protótipos foram feitos e avaliados no Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia de Biosistemas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade do Estado de São Paulo (USP). Planejou-se uma lógica de automação sequenciada de válvulas hidráulicas, controladas por válvulas multivias acionadas por um temporizador volumétrico. Construiu-se uma malha de irrigação, com quatro aspersores e em cada tubo de subida foram instaladas válvulas hidráulicas. Construíram-se protótipos dos sequenciadores para cada aspersor, constituídos de um temporizador volumétrico, uma válvula multivias e um sistema de gatilho, para troca de posição do êmbolo. Realizaram-se testes de avaliação do sistema de sequenciamento, e observou-se que os tempos de irrigação por aspersor foram semelhantes aos tempos calculados para cada temporizador. Com isso o sistema mostrou ser uma alternativa técnica viável para a automação sequenciada de aspersores em um sistema de aspersão em malha.

Palavras-chave: Automação; Inovação tecnológica; Baixo custo

ABSTRACT

Development of a hydraulic-mechanical system to actuation sequenced of net-sprinkler irrigation

The net-sprinkler irrigation system is inserted in the new concepts of irrigated agriculture, because it is simple and effective, with high competitive cost, easy deployment and low power consumption when compared to other irrigation systems. This system initially was developed to irrigate pasture however nowadays it is being expanded to other areas, such as coffee. In Brazil, the automation of irrigation systems has been intensively implemented in recent years, mainly due to the development of appropriate techniques that accompanies the agricultural modernization and openness of the Brazilian market to imports. Automation is necessary not only to reduce costs and manpower, but mainly for operational needs such as irrigation of large areas at night. The study aimed to develop and evaluate a hydraulic-mechanical device for automated sequencing of sprinkler system in a grid, to facilitate the management of the irrigation system, as well, to reduce the cost of manpower and electricity. The prototypes were made and evaluated in the Laboratory of Hydraulics and Irrigation Department of Biosystems Engineering, School of Agriculture "Luiz de Queiroz" (ESALQ), University of São Paulo (USP). It was planned a sequential logic automation of hydraulic valves, and it was controlled by multiways valve asset up by volumetric timer. It was installed a network irrigation with four sprinklers and in each sprinkler was installed a hydraulic valve. Sequential device prototypes were built for each rotor, it consist of a volume timer, a multiway valve and a trigger system to change position of the plunger. We conducted tests to evaluate the sequencing system, and noted that the sprinkler irrigation times were similar to the calculated times for each timer. The hydraulic-mechanical system developed proved to be a viable alternative to automation sequenced sprinklers in a net-sprinkler irrigation system.

Keywords: Automation; Technological innovation; Low cost

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de irrigação por aspersão em malha	24
Figura 2 - Funcionamento de uma válvula hidráulica normalmente aberta	32
Figura 3 - Representação gráfica das posições de uma válvula direcional	32
Figura 4 - Representação gráfica do número de vias de uma válvula direcional	33
Figura 5 - Válvula de 3 vias na posição 1	36
Figura 6 - Válvula de 3 vias na posição 2	36
Figura 7 - Sistema de bóia para acionamento da válvula de 3 vias	37
Figura 8 - Corpo da válvula de 3 vias	38
Figura 9 - Dimensões do êmbolo da válvula de 3 vias	38
Figura 10 - Corpo da válvula e êmbolo do protótipo 1	39
Figura 11 - Corpo da válvula e êmbolo do protótipo 3 da válvula de 3 vias	41
Figura 12 - Protótipo 1 do sistema de acionamento das válvulas de 3 vias	42
Figura 13 - Protótipo 2 do sistema de acionamento da válvula de 3 vias	44
Figura 14 - Protótipo 3 do sistema de acionamento da válvula de 3 vias	44
Figura 15 - Protótipo 4 do sistema de acionamento da válvula de 3 vias (15 a) e gatilho da válvula (15 b)	45
Figura 16 - Protótipo 5 do sistema de acionamento da válvula de 3 vias	47
Figura 17 - Tipos de formatos da extremidade da alavanca	48
Figura 18 - Temporizador do sistema automático	49
Figura 19 - Sistema operando com o primeiro aspersor funcionando	50
Figura 20- Funcionamento do primeiro aspersor do sistema de automação sequenciada. Figura da direita com início da irrigação e figura da esquerda com fim da irrigação	51
Figura 21 - Fim da irrigação no segundo aspersor sequenciado	51
Figura 22 - Sequenciador montado junto ao aspersor na malha de irrigação	52
Figura 23 - Detalhes do protótipo final	55
Figura 24 - Protótipo de melhor desempenho	58

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a agricultura brasileira vem crescendo de tal modo que hoje o país é um dos maiores fornecedores de alimentos do mundo. Entretanto, em alguns locais do Brasil as chuvas são irregulares ao longo do ano, ou deficitárias, o que torna a agricultura inviável, devido às baixas produtividades. Nesses locais, a irrigação é uma prática que viabiliza a produção agrícola, suprimindo a necessidade hídrica das plantas e minimizando os efeitos dos veranicos. Mesmo sabendo dos benefícios da irrigação, a área irrigada do Brasil ainda é pequena, quando comparada com quase 30 milhões de hectares de área disponível. São muitas as pesquisas com sistemas de irrigação, contudo, nota-se que pequenos produtores rurais estão distantes dos resultados dessas pesquisas ou encontram dificuldades de implantação de alguns sistemas, devido a entraves da legislação ambiental (autorgas da água, impactos ambientais), que impede a expansão da área irrigada. Além disso, os custos de instalação e de manutenção ainda estão aquém da realidade brasileira. Desse modo, a criação e implantação de novos sistemas de irrigação de baixo custo, podem atender as necessidades dos produtores rurais de pequeno e médio porte.

A irrigação por aspersão em malha é uma alternativa para diminuir os custos dos equipamentos de irrigação. Nos sistemas em malhas, as tubulações são todas interligadas formando redes. Com isso, a água que chega aos aspersores vem de duas tubulações, reduzindo a vazão pela metade em cada tubo, diminuindo o diâmetro da tubulação. Além disso, nesse tipo de sistema, na maioria das vezes, utiliza-se apenas um aspersor por malha, de baixa a média pressão. Conseqüentemente, os aspersores ficam mais tempo ligados em cada posição da área. Esse fato é uma vantagem do sistema, por reduzir a potência da motobomba. Essas características trazem benefícios quanto ao custo de instalação, contudo, geram problemas com o aumento da mão de obra. O agricultor precisa de muito mais tempo para manejar o sistema, com a mudança de posição dos aspersores na área, o que impossibilita a troca dos aspersores no período noturno.

Nesse contexto, a automação dos sistemas de aspersão em malha pode atender às necessidades do produtor rural, proporcionando aumento da produtividade de homem por área; assim um mesmo homem pode realizar diversas atividades, com

redução da mão de obra. Além disso, viabilizam-se as irrigações noturnas, muito vantajosas em algumas regiões, pois trazem grandes benefícios para o produtor com a redução da tarifa de energia elétrica. Esses descontos nas tarifas podem chegar a 90%, como por exemplo, aos produtores que utilizam o sistema de irrigação no período compreendido entre 21h30min às 6h. Sendo que esses horários podem variar de acordo com a região brasileira.

Desse modo, aliando-se os sistemas de aspersão em malha com uma irrigação noturna, há uma sensível redução do investimento inicial com equipamento e custos com energia elétrica, além do ganho em eficiência e uniformidade de distribuição da água na área, pois, nos horários noturnos a incidência de ventos fortes e altas temperaturas são menores. Outra vantagem da irrigação automatizada é a maior disponibilidade de tempo para o agricultor planejar suas atividades de gerenciamento da propriedade. Todavia, a automação dos sistemas em malhas é mais complexa, pelo fato da água do aspersor vir de duas tubulações de sentido diferentes, sendo necessário o desenvolvimento de uma automação específica.

O baixo custo de instalação e manutenção do sistema são algumas características da irrigação por aspersão em malha. Por isso, não é interessante o uso de automação eletrônica no sistema devido ao expressivo aumento dos custos. Assim, o uso de uma automação que não utilize energia elétrica poderia tornar viável a prática na aspersão em malha. Diante do exposto, a automação sequenciada dos aspersores por meio de um sistema de válvulas hidráulicas, controladas por um dispositivo hidráulico-mecânico, sem o uso de energia elétrica, e que proporciona o controle do tempo de irrigação, é uma alternativa técnica viável para introduzir a automação em sistemas de aspersão em malha.

Desse modo, pretendeu-se criar e avaliar um dispositivo hidráulico-mecânico para sequenciamento automático da aspersão em malha, para facilitar o manejo do sistema de irrigação de maneira a reduzir as despesas com mão de obra e energia. Para isso, foram construídas válvulas multivias para controlar a abertura e fechamento de válvulas hidráulicas, e ainda criou-se um sistema de válvulas sequenciadas para aspersão em malha. Por fim, os protótipos foram avaliados, comparando-se o tempos de irrigação calculados pelos tempos de irrigação observados, em cada aspersor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cenário da agricultura irrigada no Brasil

No cenário mundial, o Brasil vem se destacando como grande fornecedor de alimentos. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2006) a área plantada atualmente está perto de 249 milhões de hectares, correspondendo a 29% do território brasileiro. Da produção agrícola a área irrigada está em torno de 4.336.590 milhões de hectares¹, ou seja, 5% da área cultivada. De acordo com a Agência Nacional de Águas - ANA (2010) a área irrigada está distribuída da seguinte forma: 24% da área irrigada no método de inundação; 5,7% por sulcos; 18% sob pivô central; 35% em outros métodos de aspersão; 7,3% com métodos localizados e 10% com outros métodos ou molhação. Contudo, o uso de práticas de irrigação ainda é vista de maneira tímida pelos produtores brasileiros, visto que o potencial para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada é de 29,5 milhões de hectares (CHRISTOFIDIS, 2001).

Os altos custos dos equipamentos de irrigação ainda são fatores que impedem maiores crescimento de áreas irrigadas no Brasil. Sistemas de irrigação localizada, por exemplo, apresentam custos iniciais e anuais altos, quando comparados aos custos de implantação de sistemas fixos de irrigação por aspersão. Os custos podem variar consideravelmente, dependendo da cultura, da quantidade necessária de tubulações, dos equipamentos de filtragem e de fertilização e do grau de automação desejado (HERNANDEZ; ALVES JUNIOR; LOPES, 2001). Outro exemplo é o autopropelido, primeira evolução da aspersão em termos de automação, um sistema de irrigação que necessita de alta pressão de serviço e, conseqüentemente, elevado consumo de energia, o que torna o sistema como alto custo variável, sendo fator limitante na escolha do equipamento (ROCHA et al., 2005).

Fica evidente a importância de se investir no desenvolvimento de sistemas de irrigação de baixo custo, para que a prática se torne mais acessível aos produtores agrícolas. Segundo Ribeiro (2003), o aumento da produtividade e a redução de custos

¹ Revista ITEM n° 88, 4° trimestre de 2010.

somente será possível com o estabelecimento de padrões de gerenciamento adequadamente qualificado nas unidades produtivas, adoção maciça de tecnologia e insumos capazes de tornar a prática agrícola competitiva e rentável. Castro; Faria e Silva (2002) corroboram essa idéia, ao comentar que, apenas com um planejamento racional da agricultura irrigada, baseado em um projeto bem elaborado, adequadamente manejado e sem degradação do meio ambiente, é que os irrigantes poderão usufruir plenamente dos benefícios advindos da irrigação e se tornarem mais competitivos.

2.2 Irrigação por aspersão

A irrigação por aspersão caracteriza-se por fornecer água para as plantas sob a forma de chuva artificial por meio de emissores denominados aspersores, que podem ser constituídos de um ou mais bocais. A aplicação de água nos sistemas de irrigação por aspersão se faz pela divisão de um ou mais jatos de água, em uma grande quantidade de pequenas gotas no ar, que caem sobre o solo na forma de chuva artificial (BISCARO, 2009). Para Drumond e Fernandes (2001) o que incentivou o desenvolvimento da irrigação por aspersão foi a necessidade de irrigar áreas onde não era possível a utilização da irrigação por superfície, como por exemplo, terrenos de encosta, áreas mais elevadas, terrenos com declividade mais acentuada e superfície menos uniforme.

Keller e Bliesner (1990) classificam a irrigação por aspersão em dois grandes grupos: sistemas fixos, aqueles que operam com os aspersores fixos em uma posição e sistemas de movimentação contínua, que operam enquanto os aspersores estão movendo pelo campo. Para Bernardo (2006) os sistemas de irrigação por aspersão estão classificados segundo a tubulação usada, o modo de instalação no campo, os tipos de conexão ou engates entre tubos, a movimentação das linhas laterais no campo e o manejo da irrigação. O mesmo autor afirma que os sistemas de irrigação mais utilizados no Brasil são os do tipo móvel portátil convencional e semiportátil, pois requerem menor investimento de capital; contudo exigem mais mão de obra no manejo e operação. A irrigação por aspersão convencional é portátil, quando as tubulações de

distribuição e as linhas laterais são transportadas para várias posições na área irrigada, e semiportátil quando as linhas laterais são móveis e a principal é fixa.

Um sistema de aspersão convencional é composto normalmente por: captação; estação de bombeamento; tubulações; aspersores e acessórios. As tubulações são diferenciadas conforme suas funções em: sucção; recalque, principal e linha lateral. Os aspersores ou emissores são dispositivos responsáveis pela distribuição da água em forma de pequenas gotas e operam sob pressão da água fornecida pela bomba (AZEVEDO NETTO, 1998). De acordo com Tarjuelo (2005), os mais utilizados são os aspersores de um ou dois bocais, cujos jatos formam ângulos de 25° a 28° com a horizontal, e assim obter um bom alcance do jato e evitar que sejam distorcidos pelo vento demasiadamente.

Com o desenvolvimento tecnológico agrícola, novos métodos de irrigação surgem e os atuais são aprimorados para se tornarem competitivos frente à demanda crescente da prática no setor agrário. Segundo Figueredo Júnior et al. (2004), os sistemas de produção agrícola estão sofrendo mudanças com a globalização da economia, requerendo cada vez mais dos setores envolvidos utilização de tecnologias modernas, tais como instrumentação e automação para um melhor gerenciamento dos sistemas agrícolas. Para Crusciol (2007), um aspecto a ser considerado no sistema irrigado por aspersão é que devido ao alto custo de investimento em equipamentos de irrigação, é necessária a busca de tecnologias que favoreçam o uso intensivo destes sistemas.

Para Azevedo Netto (1998), alguns métodos requerem muita mão de obra, outros requerem pouca, mas em compensação necessitam de alto investimento em equipamentos ou em energia. Dessa forma, a escolha de qual método utilizar não se baseia em único fator, é um conjunto de fatores que tentam aliar um sistema com maior eficiência de aplicação de água com o menor custo de implantação e operação do equipamento. De acordo com Scaloppi (1986), fatores técnicos, econômicos e culturais, interferem na escolha do sistema de irrigação a ser utilizado, dentre tais fatores destacam-se: recursos hídricos, topografia, solos, clima, cultura, aspectos econômicos e fatores sociais.

Para Tarjuelo (2005), devem ser levados em consideração alguns critérios na decisão de qual sistema de irrigação utilizar. Dentre eles, o autor afirma que a tendência atual é o uso de sistemas de baixa pressão, que permitem a irrigação noturna e são de fácil manuseio e automação; parcelas pequenas ou de forma irregular adaptam-se melhor nos sistemas fixos; os sistemas semifixos com tubos móveis são utilizados cada vez menos, apesar de serem os que requerem menor investimento inicial, necessitam de maior mão de obra e manejo, sendo mais utilizados os fixos.

2.2.1 Aspersão em malha

Em sistemas de abastecimento de redes urbanas, a distribuição de água ocorre por redes interligadas. De acordo com a disposição dos condutos principais e o sentido de escoamento nas tubulações secundárias, as redes podem ser classificadas como ramificadas, malhadas ou mistas (GOMES, 2001). Nas redes ramificadas, o abastecimento de água é feito por meio da tubulação tronco que alimenta as tubulações secundárias, onde o sentido da vazão em qualquer trecho é conhecido. Essas redes são muito utilizadas em cidades de pequeno porte e irrigação por aspersão; todavia, uma das desvantagens é que, caso ocorra um rompimento no início da tubulação tronco, todo o fornecimento a jusante ficará comprometido (PORTO, 2006). Ainda segundo o mesmo autor, nas redes malhadas as tubulações troncos são todas interligadas entre si, formando anéis ou malhas nas quais há possibilidade de reversibilidade do sentido das vazões de acordo com a demanda.

Com essa configuração os pontos de demandas são abastecidos por vários caminhos, ocorrendo maior flexibilidade quanto à manutenção do sistema ou mesmo em casos de rompimento da rede. A principal desvantagem das redes em malha é que o seu custo de implantação é maior quando comparado a um sistema ramificado do mesmo porte (GOUTER; LUSSIER; MORGAN, 1986).

Pelo fato das redes em malha apresentarem os seus trechos interligados em formas de anéis, os fluxos de água tem sentido e valores variáveis, o dimensionamento das tubulações torna-se mais complexo, quando comparado com redes ramificadas. Segundo Cross (1936), a dificuldade surge na determinação da distribuição do fluxo na

rede, como isso é controlado por dois conjuntos simples de condições: a) o fluxo total de chegada em qualquer junção é igual ao fluxo de total de saída (continuidade do fluxo); b) a variação total do potencial ao longo de qualquer caminho fechado é igual a zero (continuidade do potencial). Estas duas condições, juntamente com a relação entre o fluxo e os potenciais, conduzem a um conjunto de equações em que ambos os fluxos nos condutores individuais ou os potenciais nos pontos de junção são tomados como incógnitas. Para solucionar o problema de dimensionamento, o mesmo autor criou em 1936 o método de aproximações sucessivas, conhecido como *Hardy-cross*.

Trata-se de um método de tentativas diretas, em que valores de vazões são estipulados previamente. Esse método é o de maior facilidade de cálculo manual, no entanto, podem apresentar um comportamento instável, não convergindo para redes com muitas malhas (FORMIGA, 2008). Para a resolução do problema de distribuição das vazões e na determinação das cotas piezométricas em cada nó, é estabelecida uma série de equações simultâneas. Em geral, convencionou-se que as vazões que fluem para os nós são positivas e as que derivam são negativas. De acordo com Drumond (2003), para as malhas convencionou-se como sentido de percurso o sentido horário, de modo que as vazões e, conseqüentemente, as perdas de carga, serão positivas se forem coincidentes com o sentido prefixado de percurso e negativas, caso contrário.

A partir do modelo das redes de distribuição de água urbano, introduziu-se o sistema em malha na irrigação por aspersão. Esse sistema tem origem na Espanha e segundo Drumond e Fernandes (2001), foi inicialmente utilizado na irrigação de pastagens na região do Vale do Rio Doce, pelo Engenheiro Agrícola Carlos Augusto Brasileiro de Alencar e por Engenheiros agrônomos da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural - Emater daquela região.

Para Rassini et al. (2007), esse tipo de sistema de irrigação é um sistema de aspersão fixo cujas linhas laterais são chamadas de "malhas" e no qual só os aspersores mudam de posição. Com isso, a mão de obra é reduzida em comparação com o sistema de aspersão convencional, que necessita da mudança tanto dos aspersores quando das linhas laterais. Coloca-se apenas um aspersor por malha, para

que a vazão do mesmo venha pelos dois lados da malha e seja possível utilizar tubos de pequeno diâmetro, geralmente 25 ou 32 mm (Figura 1).

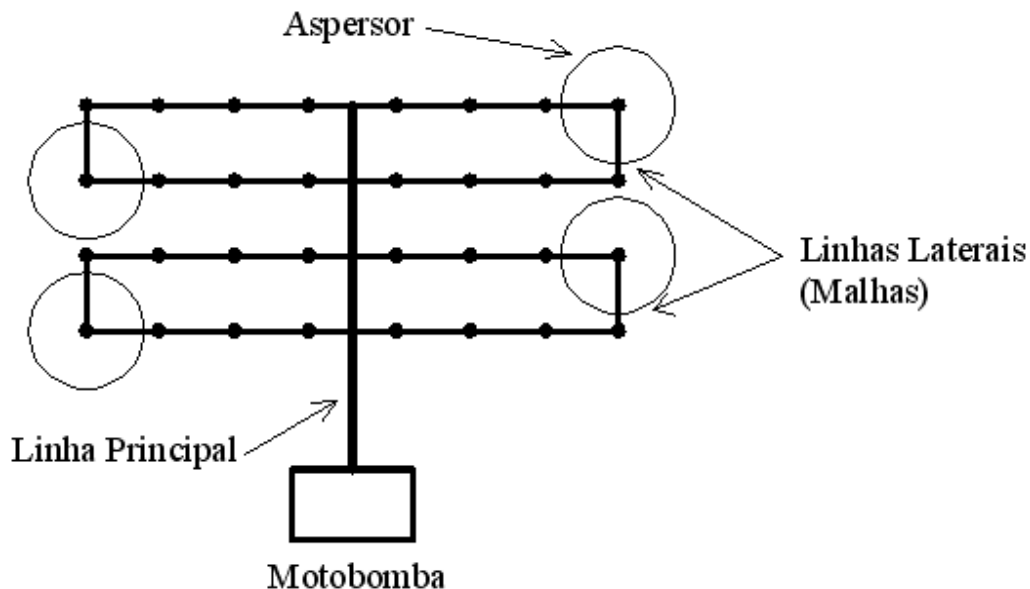


Figura 1 - Sistema de irrigação por aspersão em malha
Fonte: Rassini et al. (2007)

O uso de apenas um aspersor em funcionamento por turno de rega diminui as dimensões do sistema de irrigação e, conseqüentemente, o custo de instalação. Mendonça e Rassini (2008) afirmam que os sistemas de aspersão em malha apresentam custos de aquisição em torno de R\$ 2.200,00 a R\$ 3.200,00 por hectare. Segundo os mesmos autores, os custos de manutenção (3 % do preço de aquisição) e de operação (mão de obra + energia) são baixos, devido à ausência de movimento da tubulação e à menor potência por hectare irrigado (1 cv.ha^{-1} a 4 cv.ha^{-1}). Atualmente o investimento inicial de aquisição do sistema por hectare, sem levar em consideração a mão de obra para abrir a valetas de acomodação dos tubos, está em torno de R\$ 3.500,00 a R\$ 4.500,00.

Outro aspecto importante da irrigação em malha é a utilização de aspersores de baixa a média pressão. Segundo Alencar (2001), a utilização de sistemas de aspersão com aspersores de baixa pressão tem sido grande, em razão da baixa demanda de energia e vazão, além do baixo custo do equipamento. James e Blair (1984) apud

Drumond (2003) afirmam que, com o uso desses aspersores, pode-se diminuir em cerca de 30% o consumo de energia, quando comparado com os aspersores de média e alta pressão. Bernardo (2006) divide os tipos de aspersores em quatro grupos, quanto à pressão de trabalho: “pressão de serviço muito baixa”, entre 4 a 10 metros de coluna de água (mca); “pressão de serviço baixa”, entre 10 a 20 mca; “pressão de serviço média”, entre 20 a 40 mca e aspersores “gigantes” ou canhão hidráulico com pressão que variam de 40 a 100 mca. Mendonça et al. (2007) afirmam que aspersores de pressão muito baixa não são utilizados na irrigação de pastagens, por serem muito pequenos e geralmente estacionários. Aspersores de alta pressão e de grande porte também não são adequados a áreas pequenas e médias, em razão do elevado consumo de energia necessário ao seu funcionamento.

Desse modo, o uso de sistemas de irrigação por aspersão em malha aliado ao uso de aspersores de baixa pressão, mostra-se como excelente opção econômica. Se o uso for feito à noite, pode-se ganhar em eficiência na aplicação de água e economia de energia elétrica devido à tarifação diferenciada. Ribeiro (2003), ao analisar as Resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica 277/2000 e 540/2002, constatou que os descontos da tarifa de irrigação para usuários de energia elétrica no período das 21h30min as 06h00min, na região Nordeste do Brasil pode chegar até 90%, na região Norte e Centro-oeste até 80% e nas demais regiões do país até 70% (para usuários de energia de alta tensão).

Segundo Coelho (2002), dentre os custos de operação de um sistema de irrigação, um dos componentes principais é o consumo de energia. Nas lavouras irrigadas, o consumo de energia elétrica pode representar uma parcela dos custos de produção de até 30%, aproximadamente (BERNARDO, 2006). Mendonça et al. (2007), em seu trabalho de redimensionamento de sistemas de aspersão convencional para irrigação em malha, utilizando aspersores de baixa pressão, obteve uma redução do consumo de energia em 51%.

Por ser uma tecnologia que alia preços baixos de instalação e projeto a uma alta qualidade de irrigação, a aspersão por malha é altamente promissora para irrigação de pequenas propriedades rurais. Entretanto, Drumond e Fernandes (2001) apontam como limitações do sistema: maior dependência de mão de obra, quando comparado aos

sistemas automatizados (pivô central); abertura de valetas para acondicionamento das tubulações dispostas em malha; impossibilidade de automação total.

2.3 Automação na irrigação

Atualmente, com os debates sobre mudanças climáticas e a escassez dos recursos hídricos, a agricultura irrigada aparece competindo pela distribuição de água com os setores urbano e industrial. Sabe-se que em algumas regiões do Brasil, o consumo de água pela agricultura pode chegar a 70% do total dos recursos hídricos. Além disso, há uma pressão da sociedade para que a agricultura se torne uma atividade mais eficiente, com maior produção por área. Nesse contexto, a irrigação é uma técnica necessária, pois a aplicação de água nas culturas aumenta a eficiência de uso de outros insumos, garante a produção na entressafra em regiões áridas ou de regime pluviométrico inconstante, além de oferecer segurança durante os veranicos (QUEIROZ; BOTREL; FRIZZONE, 2008).

A utilização otimizada de água torna a automação dos sistemas de irrigação de extrema importância para o uso racional de água e melhoria da qualidade de vida. Nos últimos anos, observa-se na agricultura irrigada um avanço da automação dos sistemas. Segundo Palmieri (2009), existem inúmeros exemplos de sistemas de aquisição de dados com os mais variados graus de complexidade, devido à diversidade de situações e climas. De acordo com Alencar et. al (2007), automação é qualquer sistema que substitua o trabalho humano e que vise soluções rápidas e econômicas, a fim de alcançar os objetivos da agricultura.

É notória a migração da população rural para a área urbana, ocasionada por diversos fatores. O fato é que com o êxodo rural, a mão de obra no campo, torna-se cada vez mais escassa e cara. De acordo com Souza (2001), a falta de mão de obra, faz com que produtores rurais optem por alternativas que tornem o trabalho no campo mais produtivo, ou seja, um menor número de pessoas no campo trabalhando por unidade de área. Por outro lado, o aumento da produtividade da mão de obra agrícola pode ser alcançado com investimentos em educação e inovações tecnológicas que permitam utilizar com maior eficiência os fatores convencionais, terra e trabalho

(FREIRE, 2000). Além de suprir a falta de mão de obra no campo, a automação da irrigação, melhora a administração da propriedade agrícola. Pequenos produtores rurais muitas vezes deixam de fazer o gerenciamento adequado da sua propriedade para realizar serviços, que por meio de uma simples automação poderia ser feito. Segundo Cansado (2003), o controle automático permite um aumento da produtividade do agricultor, pois o libera para a realização de tarefas mais nobres, de gerenciamento, planejamento e tomada de decisão.

Com o uso da automação em sistemas de irrigação, é maior a precisão de quanto e quando irrigar, o que torna o uso da água mais eficiente, esse aspecto é de suma importância, quando o enfoque é a sustentabilidade da agricultura irrigada. Sistemas automáticos de controle de irrigação se tornaram uma ferramenta essencial para a aplicação de água na quantidade necessária e no devido tempo, contribuindo para a manutenção da produção agrícola e, também, para a utilização eficiente dos recursos hídricos (TESTEZLAF et.al, 2002). Para Marouelli (2003), no confronto com a opção de crescer e no processo de impor inevitável desgaste ao estoque de recursos naturais, ou conservar o meio ambiente, o crescimento sustentável provê os dois: crescimento com conservação. Christofidis (2003), afirma que as expansões das áreas irrigadas ocorrerão com maiores chances de sucesso se os equipamentos, acompanharem as melhorias de eficiência no uso da água, aumentando a competitividade dos produtos oriundos da agricultura irrigada pela redução do consumo de energia e das perdas de água.

De acordo com Figueredo Júnior et al. (2004), no Brasil a automação de sistemas de irrigação vem sendo implantada com maior intensidade nos últimos anos, principalmente em função do surgimento de técnicas apropriadas que vem acompanhando a modernização crescente da agricultura e abertura do mercado brasileiro às importações. Segundo Zazueta et al. (2002), a tecnologia presentemente utilizada nas áreas rurais inclui redes, recursos de telecomunicação, bases de dados, multimídia, sistemas de informações geográficas e aparelhos do tipo assistente pessoal digital, entre outros. Para Pereira (2006), com a evolução e barateamento da tecnologia, novas formas de controle das condições climáticas e de automação dos processos passaram a ser adotados. Esses autores corroboram a idéia de que, a automação é

necessária não somente pela possibilidade de redução dos custos com mão de obra, mas principalmente por necessidades operacionais, tais como irrigação de grandes áreas no período noturno.

Uma das maneiras para se obter uma irrigação eficiente e maximizar a produção envolve a automação do sistema para a determinação de quando e quanto irrigar, através do uso de tecnologias de sensores, comunicação, e dispositivos de atuação. Algumas vantagens são adquiridas ao utilizar-se a automação em sistemas de irrigação: diminuição de mão de obra; possibilidade de irrigações noturnas sem necessidade de acompanhamento; redução do custo de bombeamento; precisão nos tempos de turnos de irrigação e melhor planejamento. Suzuki e Hernandez (2009) afirmam que, por essas vantagens, nota-se que uma simples automação supre muita das necessidades de exploração racional e rentável, tais como a otimização dos recursos produtivos e redução de custo.

Bernardo (2006) afirma que o uso de alguns sistemas fixos de irrigação por aspersão somente são justificados, economicamente, pela escassez ou pelo elevado custo da mão de obra para a execução de irrigação, que pode ser mínima ou quase não existir nas instalações totalmente automatizadas. Além disso, sistemas fixos apresentam menores custos de manutenção operacional, como as tubulações não são movimentadas ao longo da área, há um menor desgaste das mesmas.

São muitos os trabalhos que relacionam automação eletrônica com sistemas agrícolas. Graças aos espetaculares avanços nos campos da eletrônica e de controle, sistemas “simples” estão evoluindo para outros muito mais complexos que, baseados principalmente na utilização de microprocessadores e/ou microcontroladores, possibilitam o controle total da instalação da irrigação (TARJUELO, 2005). Existem atualmente no mercado inúmeros equipamentos de qualidade, que aperfeiçoam e facilitam a utilização de sistemas de irrigação. Um exemplo é o controlador de irrigação, que comanda válvulas eletromagnéticas e aciona o conjunto motobomba. Entretanto o custo dessas válvulas e controladores pode tornar a automação do sistema inviável para pequenas áreas (SOUZA, 2001). O mesmo autor afirma que grande parte das inovações tecnológicas tem como princípio básico, dispositivos eletrônicos.

Segundo Lopez et al. (1992), com os recentes avanços no campo dos microprocessadores, conseguem-se unidades compactas a preços mais acessíveis para uso na agricultura. Entretanto, a automação no Brasil ainda é muito dependente de tecnologias importadas, que muitas vezes não satisfazem a necessidade do agricultor brasileiro. Com isso, o preço dos componentes para sistemas automáticos se torna dispendioso, dificultando o crescimento da prática no setor agrícola. Por isso, é de suma importância a pesquisa na área, para desenvolvimento de equipamentos mais baratos e mais acessíveis ao produtor.

Segundo Tarjuelo (2005), um sistema com alto grau de automação, onde a irrigação funciona independente da intervenção humana, depende de qualificação profissional na solução dos problemas que surgirem no equipamento, para que os reparos sejam executados no menor tempo possível, não afetando as culturas. Desse modo, o aumento do uso de dispositivos eletrônicos pode inviabilizar o emprego da automação por alguns produtores agrícolas. Desde o nível zero de automação até um sistema totalmente automatizado, podem-se estabelecer diferentes níveis de automatização que se adaptam às necessidades singulares do irrigante. Nesse contexto, desenvolver uma automação sem utilização de energia elétrica seria uma alternativa para diminuir os investimentos iniciais, com sistemas automáticos.

2.4 Automação da irrigação por dispositivos hidráulico-mecânicos

De acordo com Tarjuelo (2005), os sistemas de controle mais utilizados na atualidade são os de malha aberta que controlam basicamente o tempo (hora do dia e duração) em que se procede a irrigação e o volume de água a aplicar, sem levar em conta os fatores restantes que influenciam a irrigação como nível de umidade. Segundo Zazueta (1993), dois tipos genéricos de controladores são utilizados em sistemas de irrigação: sistemas de controle em malha aberta (*open control loop*) e sistemas de controle em malha fechada (*closed control loop*). A diferença entre eles é que, os sistemas em malha fechada, possuem realimentação (*feedback*), ou seja, existem elementos no sistema capazes de enviar informações sobre o processo ao controlador para que ele seja capaz de definir seu modo de atuação sobre o processo.

Em sistemas de controle de malha aberta, não há retroalimentação dos dados, ou seja, os dados de saída não são utilizados para modificar os dados de entrada, estes dispositivos comumente são conhecidos como programadores ou temporizadores. São de baixo custo por necessitar de menos componentes, e mais simples com facilidade de implantação prática. O programador conecta ou desconecta o sistema em função de uma programação pré-estabelecida pelo usuário, onde pode ser fixado a hora de início e duração da irrigação (automação por tempo), a quantidade de água a ser aplicada (automação por volume) ou uma combinação dos dois (TARJUELO, 2005).

Segundo Pizarro (1996), no método da automação por volume, mede-se a quantidade de água aplicada e, quando alcançado o volume necessário, interrompe-se a passagem de água. Com esse método, podem-se conseguir vários níveis de automação: nível 0= a abertura e fechamento das válvulas acontecem manualmente, equivale a uma ausência de automação; nível 1= cada unidade dispõe de uma válvula volumétrica que se abre manualmente, quando ocorre à passagem do volume determinado a válvula fecha; nível 2= irrigação sequencial com válvulas volumétricas; nível 3= irrigação com programação eletrônica por volumes. Ainda de acordo com o autor, na automação por tempo, é calculada a duração da irrigação em função das doses necessárias de água e da vazão dos emissores, baseando-se em dois elementos: eletroválvulas e programadores eletrônicos, apresentam como inconveniente a necessidade de energia elétrica. Entretanto, por meio de estudos e trabalhos de pesquisas, é possível o desenvolvimento da automação por tempo, sem o uso de válvulas de comando eletrônico, utilizando-se um dispositivo hidráulico-mecânico, como controlador de tempo.

Nos sistemas de controle da irrigação, um dos atuadores mais importantes são as válvulas hidráulicas (TARJUELO, 2005). Válvulas são dispositivos destinados a estabelecer, controlar e interromper a descarga de fluidos nos encanamentos. Existe grande variedade de tipos de válvulas, e, em cada tipo, existem diversos subtipos, cuja escolha depende não apenas da natureza da operação a realizar, mas também das propriedades físicas e químicas do fluido considerado, da pressão e da temperatura a que se achará submetido, e da forma de acionamento pretendida (MACINTYRE, 1987).

De acordo com Moya Talens (2009) a válvula hidráulica aproveita a pressão da água para abrir ou fechar, mediante um diafragma ou um pistão. Segundo Valverde; Peralta e Martinez (2002), as válvulas hidráulicas se compõem, independente do tipo, do corpo propriamente dito, de membrana ou diafragma, disco de acento e câmara. A regulação automática nestas válvulas se realiza mediante as chamadas válvulas de multivias, ou válvulas solenóides.

As válvulas hidráulicas podem ser do tipo normalmente aberta que fecham ao receber um comando hidráulico, ou normalmente fechadas que se abrem ao receber o comando. Valverde, Peralta e Martinez (2002) descrevem o funcionamento de uma válvula normalmente aberta, que é o tipo mais utilizado. Segundo estes autores, a superfície da membrana em contato com a água da tubulação é menor que a superfície de contato da mesma com o interior da câmara². Quando o fluxo de água da tubulação se comunica com o interior da câmara da válvula hidráulica, e a força que a água e a mola exercem sobre a membrana é maior, eq.(1), a válvula fecha (Figura 2a).

$$F_{\text{câmara}} + F_{\text{mola}} > F_{\text{água da tubulação}} \quad (1)$$

De modo contrário, quando se comunica o interior da câmara com a atmosfera (drenagem), a força da água sobre a câmara é nula ($F_{\text{câmara}}=0$). Nesse momento, como demonstra a eq. (2), a força que a pressão da água da tubulação exerce sobre a mola será superior a força da própria mola, e a válvula abre (Figura 2b).

$$F_{\text{mola}} < F_{\text{água da tubulação}} \quad (2)$$

As válvulas inseridas na parte superior de uma válvula hidráulica que permite a transmissão de pressão no interior da câmara, ou comunica esta com a atmosfera para seu esvaziamento podem ser chamadas de válvula multivias (PIZARRO, 1996) ou válvulas de controle direcional (GOMES; ANDRADE; FERRAZ, 2008). De acordo com Pizarro (1996), a válvula multivias é um dispositivo provido de várias saídas, que podem se conectar entre si em diferentes combinações por meio de uma parte móvel.

² A área do diafragma normalmente é três vezes a área de contato do disco de centro.

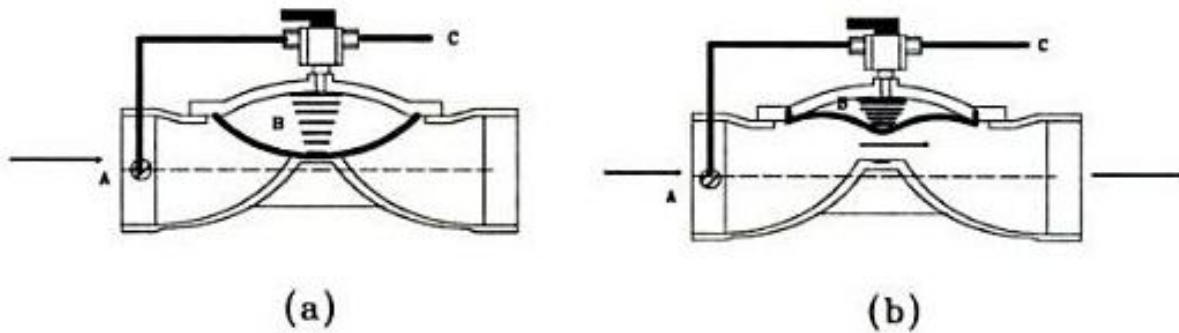


Figura 2 - Funcionamento de uma válvula hidráulica normalmente aberta
 Fonte: Valverde, Peralta e Martinez (2002)

Existem válvulas multivias de acionamento manual, porém as mais utilizadas em sistemas automatizados são as que atuam em resposta a um comando hidráulico. As válvulas multivias são classificadas pelo número de posições e de vias úteis. O número de vias corresponde ao número de conexões principais existentes em uma válvula nas quais são conectadas as tubulações hidráulicas, e o número de posições corresponde à quantidade de posições específicas que o elemento móvel da válvula é capaz de assumir (NEGRI, 2001). Gomes, Andrade e Ferraz (2008) demonstram como essas válvulas podem ser representadas graficamente, o que facilita a compreensão do seu funcionamento. O número de posições é representado por quadrados. O número de quadrados unidos representa o número de posições ou manobras distintas que uma válvula pode assumir. Deve-se saber que uma válvula de controle direcional possui no mínimo dois quadrados, ou seja, realiza no mínimo duas manobras (Figura 3).

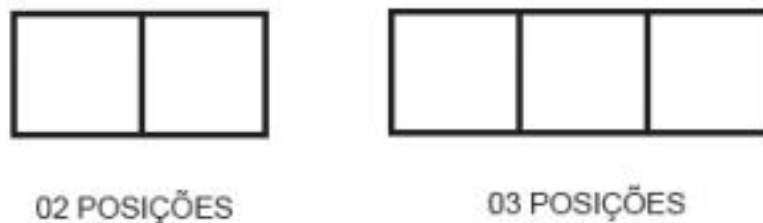


Figura 3 - Representação gráfica das posições de uma válvula direcional
 Fonte: Gomes, Andrade e Ferraz (2008)

O número de vias de uma válvula de controle direcional corresponde ao número de conexões úteis que uma válvula pode possuir (Figura 4).



Figura 4 - Representação gráfica do número de vias de uma válvula direcional
Fonte: Gomes, Andrade e Ferraz (2008)

Testezlaf et. al (2002) afirma que nem sempre é possível irrigar toda a área de uma só vez, principalmente devido a limitação de água na propriedade. Neste caso, a área deve ser dividida em setores que serão irrigados de forma seqüencial, ou seja, em uma ordem preestabelecida de necessidade de irrigação, e após a irrigação de todos os setores o ciclo é finalizado e pode ser iniciado novamente. Pizarro (1996) descreve o sequenciamento de válvulas. No entanto, o autor cita apenas o uso de válvulas volumétricas, em que consiste em aplicar água consecutivamente nas distintas unidades de irrigação, onde cada uma delas pode necessitar de volumes distintos. Ainda segundo o mesmo autor, um dos elementos fundamentais para a irrigação sequenciada de válvulas volumétrica é substituição da válvula de 3 vias por uma de 5 vias. De acordo com Tarjuelo (2005), nessa situação se procede à irrigação de forma escalonada uma vez ativada a primeira válvula e fixado os volumes a ser aplicado por todas elas. Enquanto a primeira válvula volumétrica irriga, esta envia um sinal de pressão através de uma válvula de 5 vias, que mantém fechada as demais. Quando finaliza a irrigação da primeira, se abre automaticamente a segunda, mantendo as demais fechadas, e assim sucessivamente.

Atualmente no mercado, encontram-se uma grande variedade de programadores de tempo. Entretanto, todos são dependentes de energia elétrica para seu funcionamento. Segundo Moya Talens (2009), há os programadores temporizadores que funcionam por energia elétrica, e medem o tempo e não o volume de água, não registrando as variações de vazões. Para pequenas vazões podem ser instalados

diretamente na tubulação, mas para vazões maiores é necessária a instalação de uma eletroválvula de acordo com a vazão. Há também os programadores eletrônicos que são aperfeiçoados a cada dia e permitem toda classe de programação como irrigação por volume e tempo, limpeza de filtros, abertura de válvulas. Contudo, pode-se utilizar o sequenciamento da irrigação também com válvulas hidráulicas, elaborando uma automação por tempo, com temporizador de funcionamento hidráulico-mecânico.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A fim de desenvolver uma automação para um sistema de aspersão em malha, utilizando apenas energia hidráulico-mecânica, construiu-se um sistema de acionamento automático de aspersores a partir de protótipos feitos no Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia de Biosistemas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade do Estado de São Paulo (USP), localizada no município de Piracicaba- SP. Para facilitar a compreensão, dividiu-se o trabalho em seis partes: fundamentações prática do projeto, construção da válvula de três vias, sistema de acionamento da válvula de três vias, temporizador, aplicação do sistema de sequenciamento hidráulico-mecânico para aspersão em malha e testes para avaliação do sistema de acionamento automático dos aspersores.

3.1 Fundamentações prática do projeto

O baixo custo do equipamento foi o caráter principal do projeto, tendo em vista que a aspersão em malha já possui tais características, não era interessante desenvolver uma automação que tornasse o projeto caro e de difícil aplicação prática. Dentro desse contexto, foi proposto desenvolver o acionamento sequenciado de aspersores priorizando a facilidade construtiva. Por isso, optou-se por utilizar a energia hidráulico-mecânica, fundamentando o protótipo nos princípios da alavanca e da força de empuxo. Desse modo, o sistema tornou-se independente de energia elétrica, diminuindo os custos de instalação, operacionais e de manutenção.

Diante do exposto, projetou-se um sistema para automatizar quatro aspersores em uma rede de irrigação em malha. Na haste de cada aspersor, foram instaladas duas válvulas hidráulicas (VH) em série, do tipo normalmente aberta. Para controlar a abertura e o fechamento dessas válvulas, idealizou-se uma válvula de três vias, que por meio de um acionamento hidráulico, comandava a pressão na câmara superior das VH. Esse comando era realizado da seguinte maneira: estando o êmbolo da válvula de 3 vias na posição 1 (Figura 5), a água entrava pelo orifício EA (entrada da água) e saía pelo orifício VH₂ (correspondente a válvula hidráulica superior, da haste do próximo

aspersor), pressurizando a mesma mantendo-a fechada. Conseqüentemente, a VH_1 (válvula hidráulica instalada na parte inferior da haste do aspersor) estava sob condição da pressão atmosférica, permanecendo aberta.

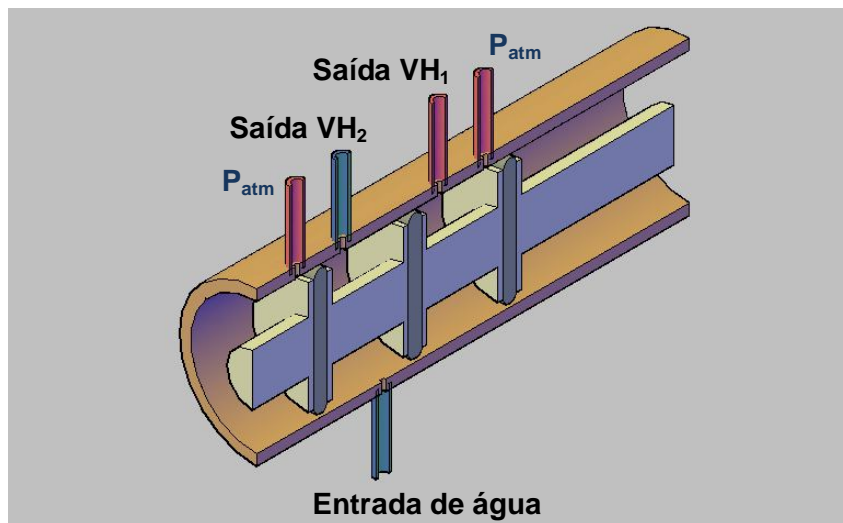


Figura 5 - Válvula de 3 vias na posição 1

Quando o êmbolo estava na posição 2 (Figura 6), a água entra por EA e sai por VH_1 pressurizando a mesma, mantendo-a fechada. Entretanto, VH_2 permanecia aberta, pois estava sob condição da pressão atmosférica.

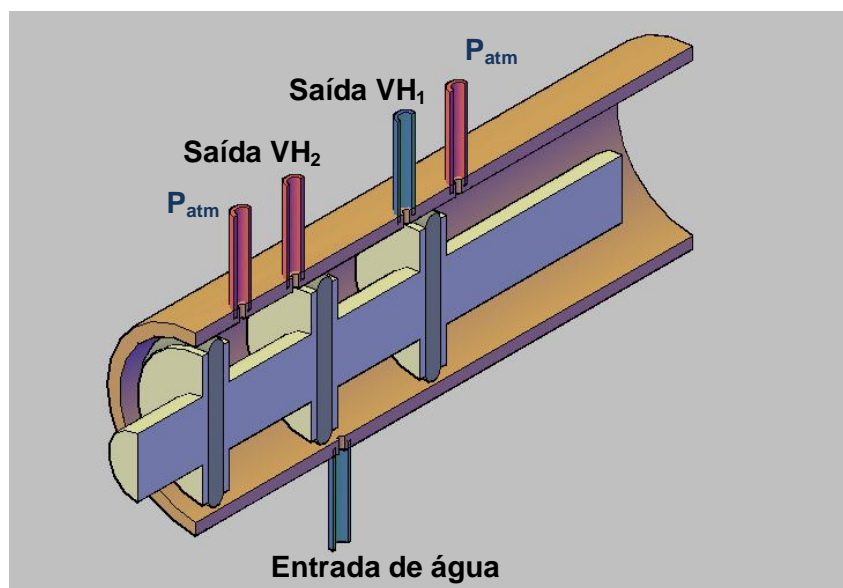


Figura 6 - Válvula de 3 vias na posição 2

Para realizar o acionamento do êmbolo da válvula de 3 vias, projetou-se um sistema de bóia e alavanca (Figura 7), acoplado a um tubo de PVC (Policloreto de Vinilo). Em uma das extremidades da alavanca estava presa a bóia, e na outra o êmbolo. A força de empuxo movia a bóia para cima e conseqüentemente o êmbolo para baixo. Por meio do deslocamento realizado pela alavanca o êmbolo trocava de posição.

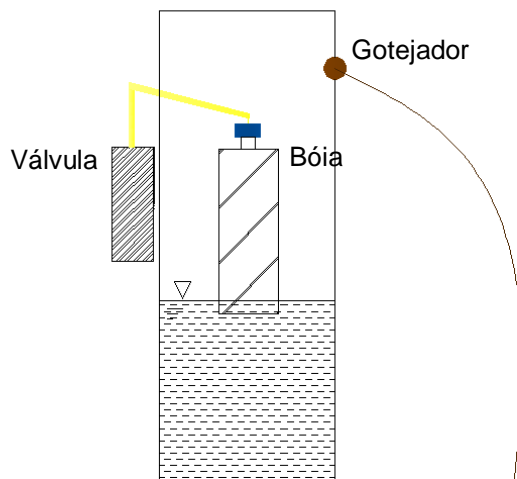


Figura 7 - Sistema de bóia para acionamento da válvula de 3 vias

Para fazer o nível d'água subir dentro do tubo e conseqüentemente, deslocar a bóia para cima conectou-se ao reservatório um gotejador, obtendo-se assim um temporizador para controlar o tempo de irrigação. De acordo com a vazão do gotejador e o diâmetro do tubo utilizado, definiam-se os tempos de irrigação.

3.2 Construção da válvula de três vias

Idealizado o projeto do sistema automático para sequenciamento dos aspersores, iniciou-se a construção da válvula de comando das válvulas hidráulicas. Para facilitar a compreensão do funcionamento da válvula multivias, nomearam-se as vias de entrada e saída como descritos a seguir: uma entrada de água (EA); uma saída de água (SA1) que pressuriza a válvula hidráulica superior, instalada na haste do próximo aspersor; uma saída de água (SA2) que pressuriza a válvula hidráulica inferior instalada na haste do aspersor; uma entrada de ar (PA1) permite que a pressão

atmosférica despressurize a válvula hidráulica superior abrindo a mesma; uma entrada de ar (PA2), que permite que a pressão atmosférica despressurize a válvula hidráulica inferior instalada na haste do aspersor abrindo a mesma. As distâncias entre os orifícios foram nomeadas conforme apresentado na Figura 8.

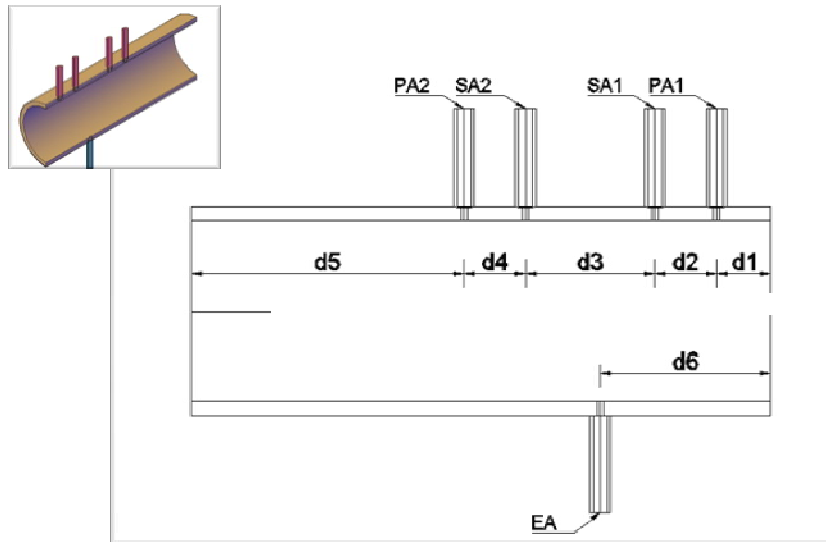


Figura 8 - Corpo da válvula de 3 vias

O êmbolo da válvula de 3 vias era constituído de uma haste composta por três saliências onde se encaixou os anéis de borracha. O comprimento da haste era de acordo com o tamanho do corpo da válvula, as distâncias entre as saliências foram calculadas de acordo com o tamanho dos anéis de borracha que se pretendia utilizar, nomeou-se as dimensões para facilitar a compressão dos tamanhos dos protótipos (Figura 9). O tamanho da espessura do anel de borracha foi nomeado como T_a .

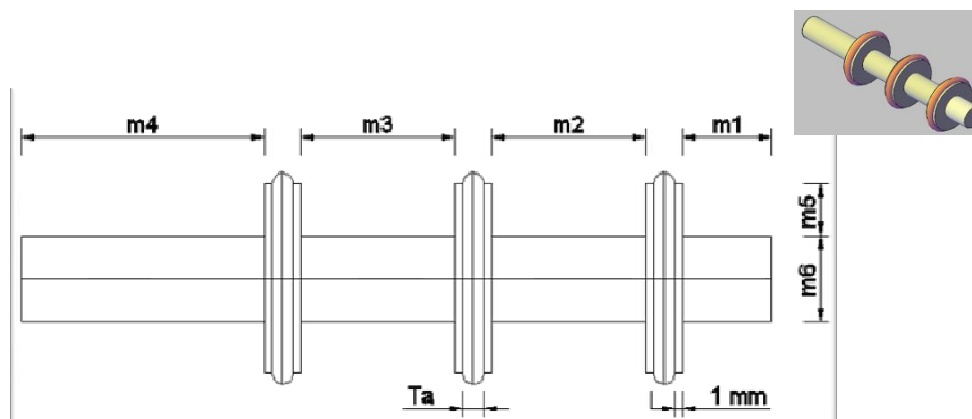


Figura 9 - Dimensões do êmbolo da válvula de 3 vias

3.2.1 Protótipo 1 da válvula de 3 vias

Na construção do êmbolo, o material escolhido a priori, foi o PVC por seu fácil manuseio no torno mecânico (Figura 10). Utilizaram-se anéis de borracha com diâmetros internos e externos de 18,72 mm e 23,96 mm, respectivamente. As dimensões foram de: m_1 de 12,7mm; m_2 de 14,2mm; m_3 de 14,2 mm; m_4 de 20,9mm; m_5 de 5,8mm; m_6 de 10,0mm; T_a de 2,62mm. Como a haste do êmbolo ficou curta, para facilitar a manipulação do protótipo durante os testes, colocou-se uma seção de parafuso para alongar a mesma.

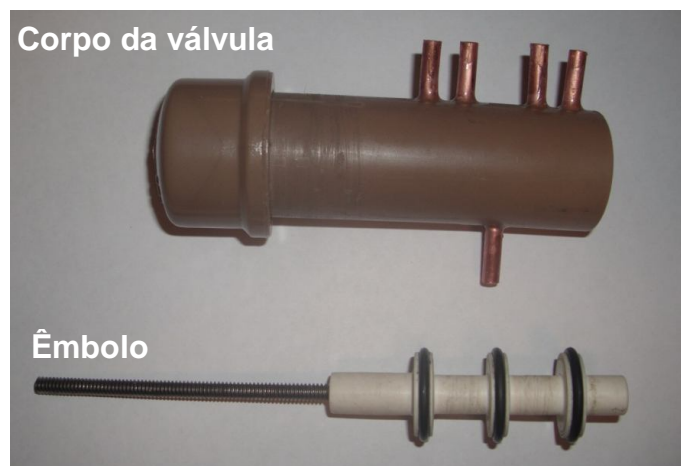


Figura 10 - Corpo da válvula e êmbolo do protótipo 1

A princípio o PVC foi usado como material para construção do corpo da válvula (Figura 10). Para o corpo da válvula foi cortada uma seção de tubo marrom com 87,63 mm de comprimento e diâmetro interno de 27,8 mm (diâmetro comercial de 1"). No entanto, o diâmetro interno do tubo era maior que o diâmetro externo do anel de borracha que se pretendia utilizar, por isso, fez-se uma luva de PVC no torno mecânico. Colocou-se a peça feita no torno na parte interna do tubo marrom, com isso o diâmetro interno ficou com 24,16 mm. Para dar acabamento lixou-se a peça até alcançar uma superfície lisa e homogênea. Após esse procedimento fez-se orifícios de 1 mm no tubo, com os seguintes espaçamentos: $d_1=7,8\text{mm}$; $d_2=9,35\text{mm}$; $d_3=19,2\text{mm}$; $d_4=9,35\text{mm}$; $d_5=41,93\text{mm}$ e $d_6=24,6\text{mm}$. Colaram-se pedaços de tubo de cobre nos orifícios, para facilitar a instalação dos microtubos de testes.

Em seguida, testou-se preliminarmente a válvula fazendo-se movimentos horizontais com o êmbolo simulando a troca de posições. Para observar se o atrito entre os anéis de borracha e a parede da luva de PVC, comprometia o deslocamento do êmbolo. Antes de realizar o teste do atrito, colocaram-se nos anéis graxa branca de lítio (náutica). Em seguida conectou-se um microtubo em EA, que recebia água de uma motobomba (Marca KSB, modelo Hydrobloc P500), e foram realizadas as trocas de posição do êmbolo. Observou-se se haviam vazamentos na válvula e se a água estava saindo em SA1 e SA2. A válvula não apresentou nenhum vazamento. Entretanto, o êmbolo estava apresentando dificuldade no movimento horizontal, devido o atrito dos anéis de borracha com as paredes da luva de PVC. Por isso, descartou-se esse protótipo, seguindo para a construção do protótipo 2.

3.2.2 Protótipo 2 da válvula de 3 vias

O modelo do segundo êmbolo seguiu o mesmo padrão do primeiro (Figura 10) todavia com dimensões menores, para reduzir a força de atrito. Os anéis de borracha utilizados nesse protótipo possuíam diâmetro interno 13,94 mm e espessura de 2,62 mm. As dimensões foram: m_1 de 4,0mm; m_2 de 10,6mm; m_3 de 14,5mm; m_4 de 30,0mm; m_5 de 3,95; m_6 de 7,4mm.

Para a construção do protótipo 2 do corpo da válvula, continuou-se a utilizar como material o PVC. Para fazer o furo interno no tarugo de PVC com 61,8 mm de comprimento e 32,0 mm de diâmetro externo, utilizaram-se inicialmente brocas de diâmetros menores, aumentando-se gradativamente até chegar ao diâmetro interno de 19,6 mm. Foram feitos os orifícios de entrada e saída, de água e ar, com 1mm de diâmetro, nas distâncias descritas a seguir: $d_1= 7,4$ mm; $d_2=8,4$ mm; $d_3= 16,0$ mm; $d_4= 10,4$ mm; $d_5= 19,0$ mm e $d_6= 23,5$ mm.

Após a montagem do segundo protótipo se procedeu ao mesmo teste preliminar do protótipo 1, com o qual se pôde notar que a válvula não apresentou vazamentos. No entanto, o êmbolo continuava apresentando dificuldade na troca de posição, mesmo com a redução do diâmetro interno o problema com atrito persistia. Descartou-se o

protótipo 2, seguindo na construção do protótipo 3, entretanto, trocou-se o material para latão.

3.2.3 Protótipo 3 da válvula de 3 vias

Para a construção do êmbolo utilizou-se um tarugo de latão (Figura 11), com diâmetro no tamanho que se pretendia dispensando o torneamento do mesmo. Por possuir um diâmetro menor que os outros protótipos, mudou-se a configuração do êmbolo e não se fez mais as saliências, apenas canaletas onde eram encaixados os anéis de vedação. Os anéis de borracha utilizados tinham 2,68mm de diâmetro interno e 3,62mm de espessura. As dimensões do êmbolo foram: m_1 de 28,0mm; m_2 de 11,7mm; m_3 de 12,5mm; m_4 de 30,0mm; m_5 nulo; m_6 de 6,35mm. O diâmetro das canelas de encaixe dos anéis era de 4,8mm.



Figura 11 - Corpo da válvula e êmbolo do protótipo 3 da válvula de 3 vias

Para reduzir os problemas com atrito interno entre os anéis de borracha e a parede da válvula, construiu-se o corpo da válvula em latão. Torneou-se um tarugo de latão de 70mm de comprimento fazendo-se um furo com broca de 11mm. Em seguida, utilizou-se um alargador para polimento das paredes, obtendo-se um diâmetro interno final de 11,4mm. Por fim, os orifícios foram feitos com 1,0mm de diâmetro, para entrada e saída de água e ar. Os valores das distâncias são apresentados a seguir: $d_1=6,64\text{mm}$; $d_2=7,2\text{mm}$; $d_3=13,95\text{mm}$; $d_4=5,8\text{mm}$; $d_5=34,0\text{mm}$; $d_6=20,8\text{mm}$.

Após a montagem do protótipo 3 procedeu-se os mesmos testes preliminares dos protótipos anteriores. Com os quais, notou-se que a válvula não apresentava vazamentos, nem problemas com atritos na troca de posição do êmbolo. Portanto, decidiu-se utilizar esse protótipo para controlar as válvulas hidráulicas.

3.3 Sistema de acionamento do êmbolo da válvula de 3 vias

Construída a válvula de 3 vias, iniciou-se a elaboração do dispositivo para acionamento do êmbolo. Para tal, montou-se uma estrutura junto a um tubo de 100 mm, para sustentar a válvula e o sistema de bóia. Todos os protótipos tiveram o mesmo princípio de funcionamento: uma bóia presa a uma haste movimentar-se-ia por meio da força de empuxo e após um determinado tempo a haste acionava o êmbolo para realizar a troca de posição.

3.3.1 Protótipo 1 do sistema de acionamento do êmbolo

A idéia inicial era construir a haste na horizontal de forma que esta funcionasse como uma alavanca. Em uma das extremidades estava presa a bóia e na outra extremidade um parafuso conectava a haste com o êmbolo (Figura 12).



Figura 12 - Protótipo 1 do sistema de acionamento das válvulas de 3 vias

O ponto fixo da alavanca foi posicionado para ficar mais próximo da válvula obedecendo aos princípios da alavanca em que: quando o fulcro (ponto fixo) está

relativamente próximo à carga, uma pequena força na entrada (bóia) produz uma grande força na saída (êmbolo).

Foi parafusado um joelho soldável de PVC de 90°, na saída de um colar de tomada de 85 x 3/4", para fazer o suporte da válvula. Instalou-se o colar de tomada em um tubo de PVC de 100 mm e se prendeu a válvula no joelho de PVC, com isso a distância do êmbolo e da bóia em relação ao fulcro ficou de 13mm e 68mm, respectivamente. Utilizou-se dois parafusos de 4mm na posição transversal, um para vincular a haste ao êmbolo e o outro para fazer o ponto fixo da haste. Para a construção da bóia, utilizou-se uma garrafa PET (Politereftalato de etileno) de 500 ml, que foi colada na outra extremidade da alavanca.

Após montado esse sistema de acionamento do êmbolo, realizou-se testes para avaliar o desempenho do mesmo. O teste consistiu em encher o tubo com água até uma altura em que a bóia deslocasse a alavanca e acionasse o êmbolo da válvula multivias. O objetivo era avaliar se a troca de posição ocorria conforme o previsto. Notou-se que a alavanca foi eficaz, entretanto, quando o êmbolo mudava para posição 2 havia um deslocamento lateral do eixo, exercendo um esforço entre os anéis de borracha e a parede do corpo da válvula. Por isso, decidiu-se mudar a forma em que a alavanca realizava a troca de posição do êmbolo. Para tal, iniciou-se a construção do protótipo 2.

3.3.2 Protótipo 2 do sistema de acionamento do êmbolo

O protótipo 2 possuía a mesma estrutura do protótipo 1, todavia retirou-se o parafuso que acoplava o êmbolo a haste. Construiu-se a alavanca de maneira que a mesma apenas empurrava a extremidade superior do eixo (Figura 13). Procedeu-se o mesmo teste realizado com protótipo 1 e observou-se que o problema de deslocamento do êmbolo havia sido eliminado, mas notou-se que a troca de posição acontecia de forma lenta. Para tornar a troca de posição instantânea, optou-se por fazer um sistema de gatilho. Prosseguiu-se na construção do protótipo 3.



Figura 13 - Protótipo 2 do sistema de acionamento da válvula de 3 vias

3.3.3 Protótipo 3 do sistema de acionamento do êmbolo

Na construção do protótipo 3 continuou-se a utilizar a estrutura de suporte do protótipo anterior, contudo, fez-se uma modificação no êmbolo. Na parte superior do êmbolo, torneou-se uma canaleta para encaixar uma pequena haste de metal (Figura 14).

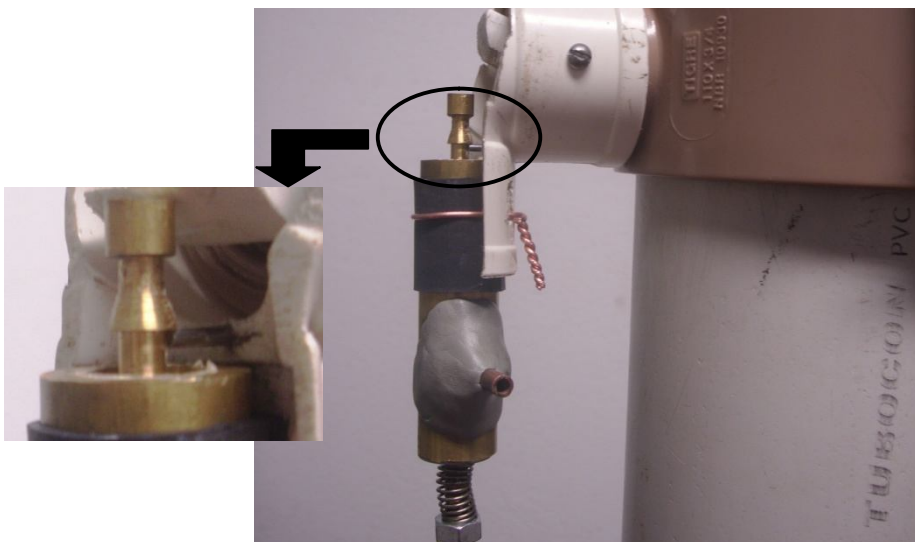


Figura 14 - Protótipo 3 do sistema de acionamento da válvula de 3 vias

Na parte inferior foi feita uma rosca de 1/4", onde uma porca de metal regulava a tensão da mola que puxava o êmbolo. O gatilho disparava da seguinte maneira: na posição 1 a haste de metal estava encaixada na canaleta segurando o êmbolo, pois a tensão da mola estava puxando este para a segunda posição. Quando a alavanca tocava na lateral superior do êmbolo, o eixo era deslocado disparando o gatilho, ou seja, a tensão da mola puxava o êmbolo para baixo.

Depois de construído, fizeram-se os mesmos testes realizados com os protótipos anteriores, para avaliar o funcionamento do sistema de disparo. Observou-se que o disparo operava de maneira satisfatória quanto à troca de posição do êmbolo. Entretanto, com o novo protótipo retornou-se ao problema anterior, que era o deslocamento lateral do eixo. Por isso, esse protótipo foi descartado e se prosseguiu para a construção do protótipo 4, com um novo sistema de gatilho.

3.3.4 Protótipo 4 do sistema de acionamento do êmbolo

Este protótipo não foi executado na prática, visto que já na sua construção foram encontrados problemas, mas foi por meio desse protótipo que se chegou ao modelo final. Para a fabricação do corpo da válvula foi utilizado como material o PVC, pois era de fácil manuseio para a confecção do orifício, onde se instalou o parafuso (Figura 15).

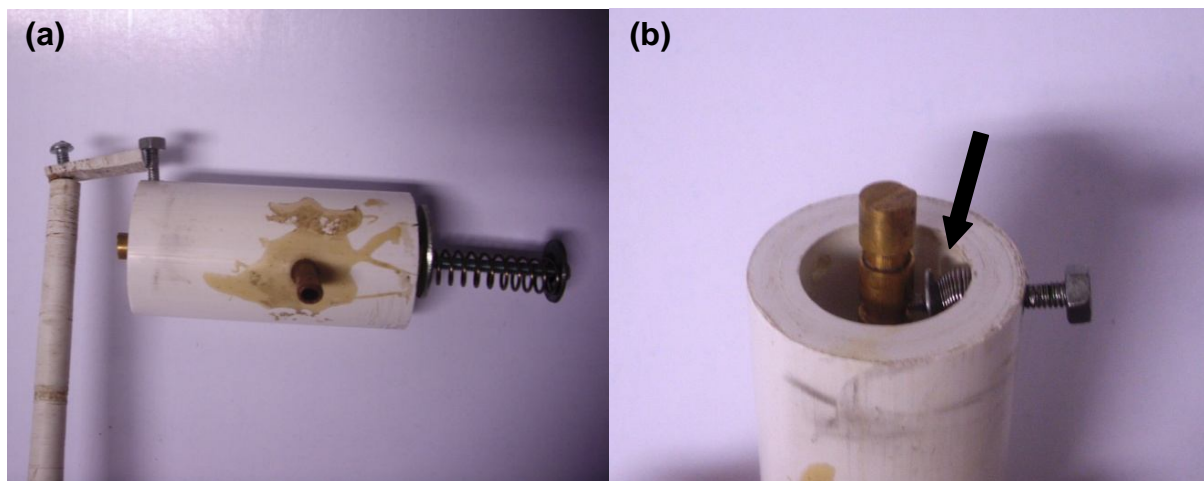


Figura 15 - Protótipo 4 do sistema de acionamento da válvula de 3 vias (15 a) e gatilho da válvula (15 b)

A idéia para a construção do acionamento do gatilho era mudar a estrutura de suporte da válvula, nos sistemas anteriores o êmbolo se encontrava na vertical, com o modelo 4, girou-se o eixo para a horizontal (Figura 15a). Um parafuso se encaixava na canaleta do êmbolo segurando-o para que a força da mola não o puxasse. Uma haste que estava presa a bóia, deslocava-se verticalmente por meio da força de empuxo, quando a haste chegasse a uma determinada altura empurrava o parafuso para cima liberando o gatilho, fazendo com que o êmbolo trocasse de posição. Colocou-se uma mola no parafuso que segurava o êmbolo com o intuito de facilitar no engatilhamento (Figura 15b).

Mas antes mesmo de realizar os testes nesse protótipo, observou-se que havia um problema no gatilho. Quando este estava armado, a mola do êmbolo exercia um esforço no parafuso, deslocando o eixo do mesmo, dificultando o seu movimento. O protótipo 4 foi descartado e seguiu-se na construção do protótipo 5.

3.3.5 Protótipo 5 do sistema de acionamento do êmbolo

Com o problema encontrado no protótipo 4, mudou-se o sistema de gatilho. Torneou-se um tarugo de PVC, moldando uma alavanca com 61 mm de comprimento e 5,8 mm de diâmetro, em uma das extremidades foi confeccionada uma trava e na outra o ponto de apoio (fulcro da alavanca). Posicionou-se a válvula na horizontal a uma distância tal, que a alavanca ficava encaixada na canaleta do êmbolo. Quando a bóia atingisse uma altura determinada empurrava a alavanca, acionando o gatilho para a troca de posição.

Fez-se a canela com 4,0mm de espessura e a uma distância de 20,0mm do anel de borracha mais próximo. Entre a alavanca e a parte superior do seu suporte, colocou-se uma mola para facilitar a volta da mesma quando houvesse o engatilhamento. A tensão da mola regulava a velocidade em que o êmbolo trocava de posição, ou seja, quanto mais tensionada a mola mais rápido era o movimento de troca. Essa tensão da mola era regulada por meio de um parafuso localizado na extremidade do êmbolo (Figura 16).

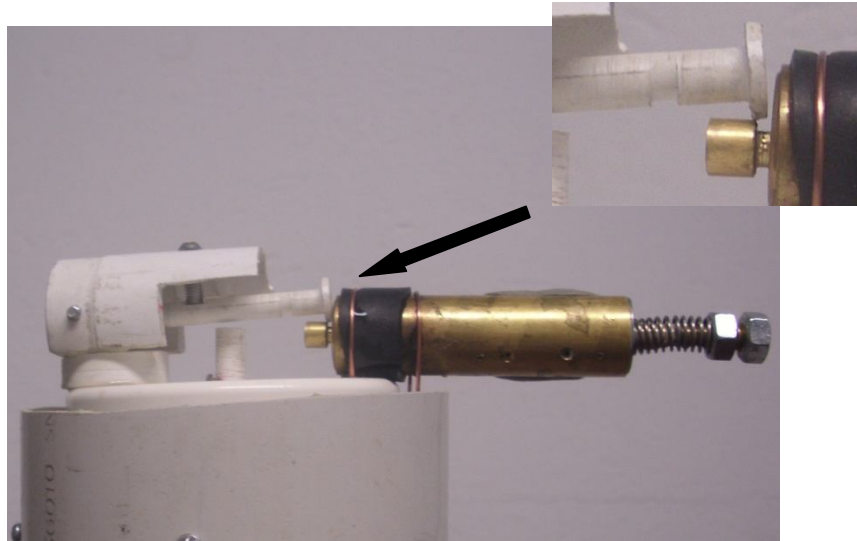


Figura 16 - Protótipo 5 do sistema de acionamento da válvula de 3 vias

Após a construção do protótipo 5, foram feitos os mesmos testes, já citados na descrição dos protótipos anteriores, para avaliar o desempenho do gatilho. Verificou-se que a bóia estava empurrando a alavanca para acionamento do gatilho. Além disso, ocorreu a troca de posição de maneira instantânea e sem vazamentos. Estes testes demonstraram que o protótipo 5 alcançara os objetivos esperados, assim, escolheu-se o mesmo como modelo final para o sistema de acionamento sequenciado dos aspersores.

Foram construídos mais três modelos semelhantes ao protótipo 5, para realização dos testes posteriores, entretanto foi modificado um componente no sistema de gatilho. Na confecção das alavancas foi feita uma alteração na extremidade da haste que segurava o êmbolo, tomou-se tal decisão no intuito de testar qual formato obteria melhor desempenho no momento do desarme do gatilho. No protótipo 5 a extremidade possuía formato circular com 10,5 mm de diâmetro (sequenciador 1- Figura 17a) e 2,4 mm de altura para encaixe na canaleta do êmbolo. As outras alavancas possuíam os seguintes formatos: alavanca 2= extremidade quadrada com 1,65 mm de encaixe na canaleta (sequenciador 2- Figura 17b); alavanca 3= extremidade circular com 1,0 mm de encaixe (sequenciador 3- Figura 17c); alavanca 4= extremidade em bisel com 2,31 mm de encaixe (sequenciador 4 – Figura 17d). As três alavancas possuíam em comum o comprimento e o diâmetro de com 73,0 mm e 8,0 mm, respectivamente.

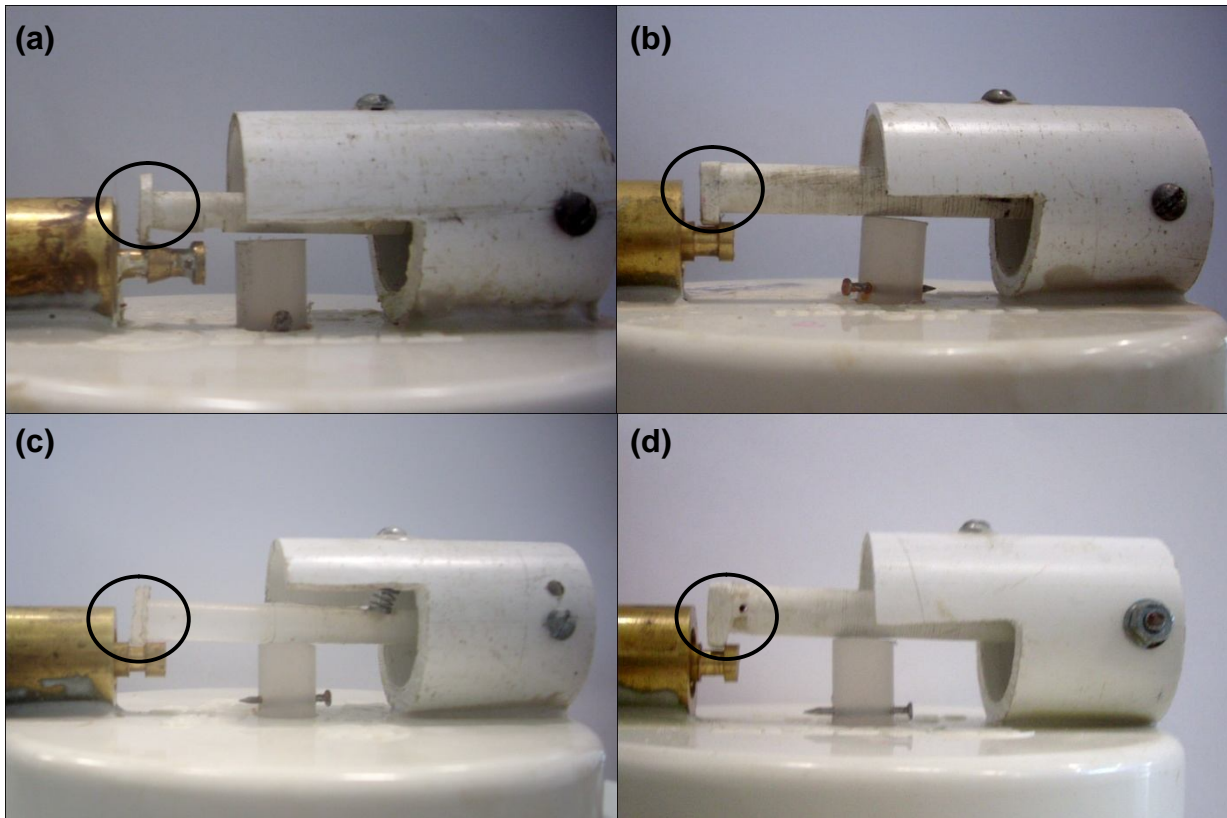


Figura 17 - Tipos de formatos da extremidade da alavanca

3.4 Temporizador

Feitos os protótipos das válvulas e seus sistemas de acionamento, iniciou-se a confecção do temporizador. Para isso, utilizou-se um tubo de 100 mm de diâmetro e 850 mm de comprimento; na parte inferior foi colocado um cap e se vedou com silicone. Para visualizar a altura da água dentro do tubo, conectou-se um microtubo transparente, formando vasos comunicantes, e colou-o na parte externa do tubo. Instalou-se na parte superior do tubo um gotejador autocompensante de 2 L.h^{-1} que controlava o tempo de irrigação por meio da vazão, obtendo-se com essa estrutura uma automação por método volumétrico.

O temporizador funcionava do seguinte modo: uma escala de tempos de irrigação foi colocada ao lado do microtubo transparente, assim quando a duração de operação do aspersor era correspondente à uma hora, preenchia-se o tubo com água

até a altura indicada pela seta. Para uma irrigação de uma hora e meia, o temporizador era preenchido com água até a seta correspondente (Figura 18).



Figura 18 - Temporizador do sistema automático

3.5 Aplicação do sistema de sequenciamento hidráulico-mecânico para aspersão em malha

Após a construção do sistema automático, projetou-se a lógica do sequenciamento de maneira que apenas um aspersor funcionasse por vez, para isso, fez-se as ligações entre os sequenciadores do seguinte modo: no sequenciador 1 a SA1 estava conectada a VH superior do aspersor 2 e a SA2 estava conectada a VH do aspersor 1; no sequenciador 2 a SA1 estava conectada a VH superior do aspersor 3 e a SA2 estava conectada a VH inferior do aspersor 2; no sequenciador 3 a SA1 estava conectada a VH superior do aspersor 4 e a SA2 estava conectada a VH inferior do aspersor 3; no sequenciador 4 a SA1 estava conectada novamente a linha lateral do sistema e SA2 estava conectada a VH inferior do aspersor 4. Os gotejadores de cada sequenciador estavam conectados nas hastes do aspersores logo acima da VH

superiores e as entradas de água (EA) das válvulas de 3 vias estavam conectadas nas hastes dos aspersores logo abaixo da VH inferior (Figura 19).

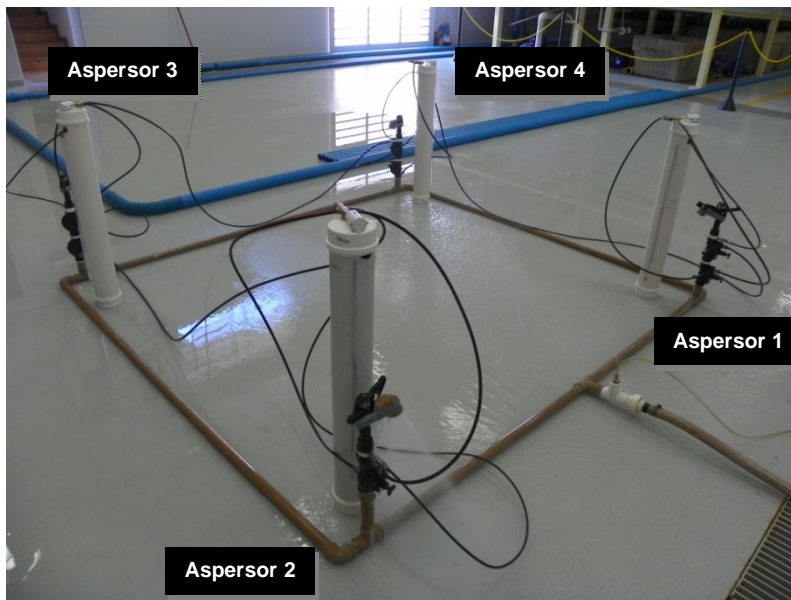


Figura 19 - Sistema operando com o primeiro aspersor funcionando

Antes de iniciar a irrigação era necessário que todos os sequenciadores estivessem engatilhados, ou seja, com o êmbolo da válvula de 3 vias na posição 1. Desse modo, o único aspersor a funcionar foi o primeiro, os outros permaneciam fechados, pois cada válvula de 3 vias pressuriza a VH superior do aspersor seguinte. Também era necessário que o reservatório do sequenciador estivesse preenchido até a altura correspondente ao tempo de irrigação.

Iniciava-se a irrigação com o aspersor 1 e simultaneamente o gotejador começava a encher o reservatório do seu respectivo temporizador. No fim do tempo de irrigação, a haste da bóia empurrava a alavanca e ocorria a troca para a posição 2 na válvula de multivias. Feita a troca de posição, a VH do aspersor 1 era pressurizada e o gotejamento parava conseqüentemente, a câmara da VH superior do aspersor seguinte era despressurizada, iniciando a irrigação do aspersor 2 e o temporizador do segundo sequenciador (Figura 20).

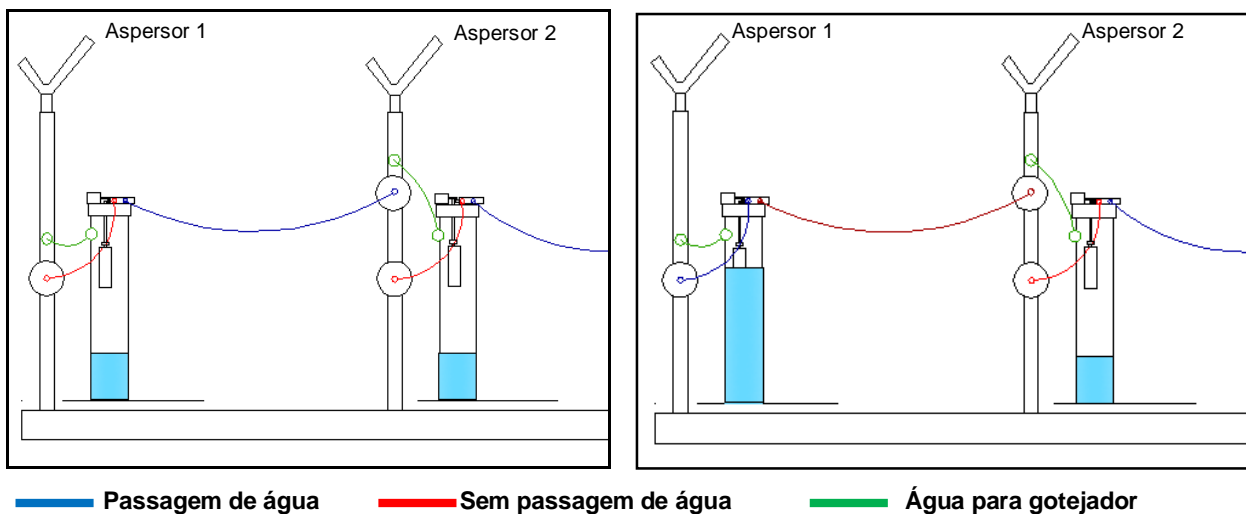


Figura 20 - Funcionamento do primeiro aspersor do sistema de automação sequenciada. Figura da direita com início da irrigação e figura da esquerda com fim da irrigação

Em seguida, o gotejador do segundo sequenciador enche o temporizador até o nível do tempo de irrigação, quando a haste da bóia empurrava a alavanca, o êmbolo da válvula de 3 vias era acionado mudando para a posição 2. Com isso, a VH inferior do aspersor 2 era pressurizada e o parava o gotejamento, ao mesmo tempo a VH superior do aspersor 3 despressurizava, iniciando a irrigação e o temporizador do terceiro sequenciador (Figura 21).

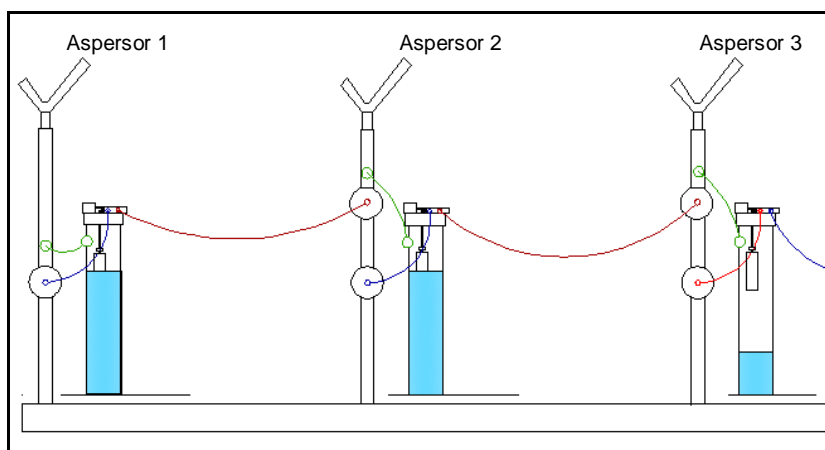


Figura 21 - Fim da irrigação no segundo aspersor sequenciado

O aspersor 3 funcionava da mesma forma que o aspersor 2. No fim do tempo de irrigação, a haste da bóia acionava a válvula de 3 vias, ocorrendo à troca de posição.

Desse modo, a VH inferior do aspersor 3 era pressurizada e parava o gotejamento, ao mesmo a VH superior do aspersor 4 despressurizava, iniciando a irrigação e o temporizador do quarto sequenciador.

Esse processo pode ser realizado para quantos aspersores forem necessários, entretanto, para facilitar os testes, fez-se a automação para apenas quatro aspersores. Quando o último sequenciador iniciava seu funcionamento, o gotejador começava a encher o reservatório do temporizador até o momento em que a haste da bóia desarmava o gatilho, e o êmbolo realizava a troca de posição. Quando a VH inferior do quarto aspersor era pressurizada e o temporizador parava, a irrigação foi finalizada.

3.6 Testes de avaliação do sistema de acionamento automático dos aspersores

Com todo o sistema de acionamento pronto, começaram-se os testes de avaliação da automação da irrigação. Montou-se no Laboratório de Irrigação um sistema de aspersão em malha, com 3 metros de comprimento em cada linha lateral e diâmetro dos tubos de 1". Utilizou-se esse comprimento e diâmetro de tubulação, para facilitar a instalação da rede dentro do laboratório. Instalaram-se os aspersores e sequenciadores conforme (Figura 22).



Figura 22 - Sequenciador montado junto ao aspersor na malha de irrigação

A tomada de água para o gotejador foi instalada no tubo de subida dos aspersores logo acima da VH superior e a tomada de água para a EA da válvula de 3 vias foi conectada na VH inferior. No tubo de subida do primeiro aspersor foi instalada uma válvula hidráulica, e nos tubos de subida dos outros aspersores foram instaladas duas VH. Os aspersores utilizados foram da marca Agropolo modelo NY25 com pressão de serviço entre 20 a 35 mca.

Antes de iniciar os testes conferiam-se os gatilhos dos quatro sequenciadores, pois, deveriam estar na posição 1. O gotejador do primeiro sequenciador era desconectado, e depois de ligada a motobomba se conectava novamente e, simultaneamente, tinha início à contagem de tempo por meio de um cronômetro.

Os primeiros testes foram necessários para cronometrar o tempo em que a bóia demorava em deslocar a alavanca e, com isso, desarmar o gatilho, tomando como referência de altura zero na escala do timer, a partir da face inferior da bóia. Para isso, mediu-se com uma trena a altura desde a face superior do CAP até a parte inferior da bóia, e marcou-se essa mesma altura no tubo transparente (detalhe Figura 22), então quando o teste iniciava o reservatório já estava cheio de água até a marca “bóia”.

Com os tempos de desarme cronometrados, pôde-se calcular a escala do temporizador. Utilizou-se a eq. (3) para a obtenção de 60 minutos de irrigação na escala:

$$T = 60 - t \quad (3)$$

Em que,

T: tempo para completar uma hora de irrigação (minutos);

t: tempo de desarme do gatilho (minutos).

Então, por meio da eq. (4) calculou-se o volume correspondente ao tempo T:

$$\text{Vol} = T * q \quad (4)$$

Em que,

Vol: volume no tubo, correspondente ao tempo para completar uma hora de irrigação (m^3);

T: tempo para completar uma hora de irrigação (horas);

q: vazão do gotejador ($m^3 \cdot h^{-1}$).

Para obter o resultado da altura correspondente à uma hora de irrigação, utilizou-se a eq. (5):

$$H = \frac{\text{Vol}}{S} \quad (5)$$

Em que,

H: altura marcada no tubo (m);

Vol: volume no tubo, correspondente ao tempo para completar uma hora de irrigação (m^3);

S: área do tubo (m^2).

Além de verificar o tempo em que a bóia demorava em deslocar a alavanca, durante o teste se analisava possíveis vazamentos entre os conectores das válvulas de 3 vias e os microtubos. Com a escala de tempo pronta, iniciaram-se os testes para 1 hora, e 1h30min de irrigação onde foi verificado se a duração obtida era a mesma que a calculada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo final do sistema de acionamento automático dos aspersores em malha pode ser visualizado na Figura 23.

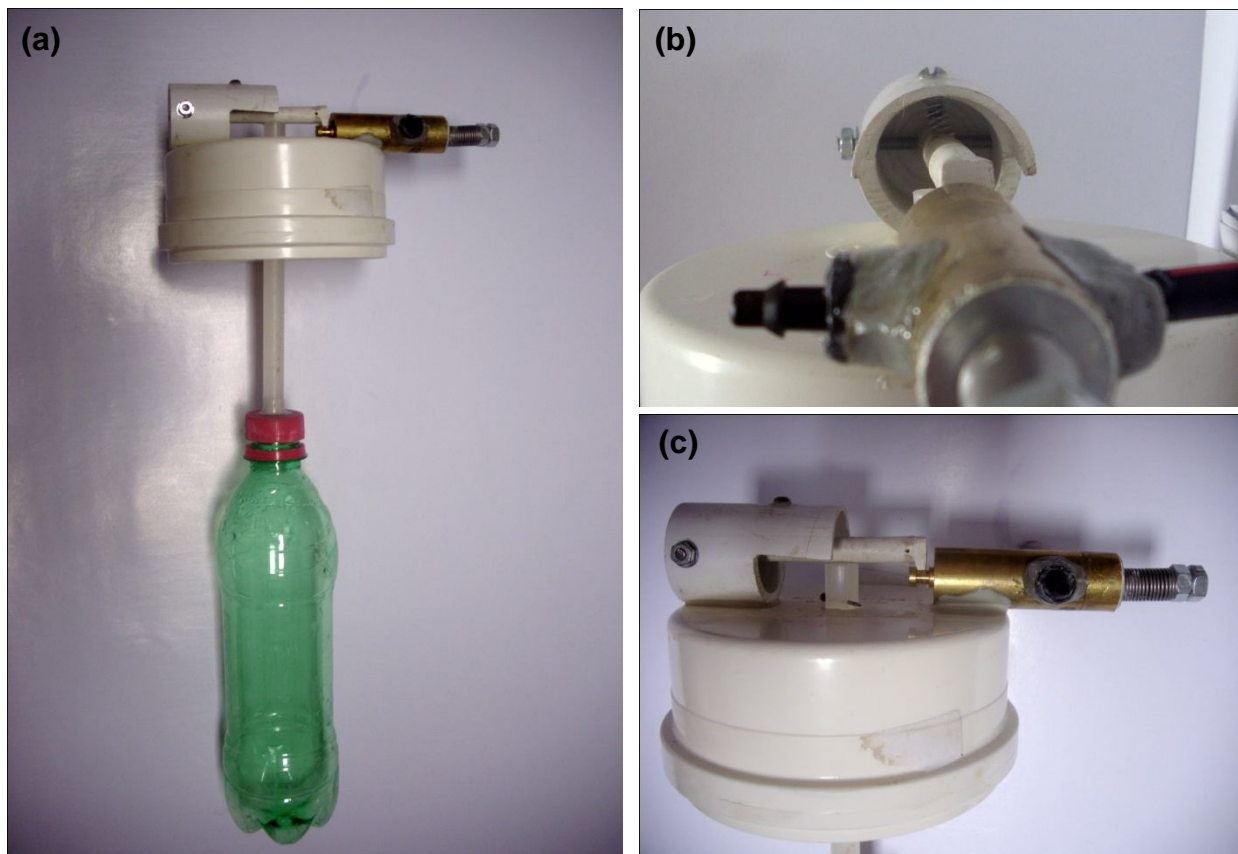


Figura 23 - Detalhes do protótipo final

Após a finalização da construção dos protótipos, fizeram-se os testes de avaliação do sistema de sequenciamento automático. Como nos primeiros testes o tempo zero era o correspondente a face inferior da bóia, fez-se as medidas das alturas das bóias de cada sequenciador, desde a face superior do cap de PVC até a parte inferior da bóia: sequenciador 1= 0,308 m; sequenciador 2= 0,304 m; sequenciador 3= 0,309 m e sequenciador 4= 0,308 m. Depois de marcada essas alturas no temporizador, fizeram-se os testes para cronometrar o tempo de desarme. Entretanto, ao realizar o primeiro teste, verificou-se que três válvulas multivias apresentavam vazamentos nos conectores, onde eram encaixados os microtubos. Utilizou-se

Durepox® para colar os conectores ao corpo da válvula, mas a cola não foi eficiente na vedação, por isso, colocou-se silicone na junção conector-durepox, resolvendo os problemas com vazamentos (Figura 23b). Também foi observado que todas as válvulas multivias estavam fazendo a troca de posição muito lentamente, por isso, apertou-se o parafuso de todos os êmbolos regulando a tensão da mola. Nota-se que o tempo de irrigação para o aspersor dois, foi maior quando comparado com os outros aspersores, devido um vazamento no temporizador (Tabela 1). Depois de solucionar os problemas encontrados se prosseguiu ao segundo teste.

Tabela 1 - Tempo de irrigação dos aspersores, tomando como referência de tempo zero, a face inferior da bóia

	1° Teste	2° Teste	3° Teste	4° Teste
Sequenciador 1	24min42seg	27min46seg	36min37seg	28min20seg
Sequenciador 2	40min27seg	30min02seg	23min58seg	26min04seg
Sequenciador 3	28min10seg	24min53seg	28min41seg	30min35seg
Sequenciador 4	29min18seg	34min27seg	21min14seg	28min20seg

No segundo teste (Tabela 1), os problemas de vazamentos foram sanados. Entretanto, a troca de posição em três válvulas demorava um tempo médio de 30 segundos. Por isso, lubrificaram-se melhor os anéis de borracha do êmbolo, com graxa náutica - branca de lítio, para diminuir o atrito. Em seguida, fez-se o terceiro teste e foi constatado que não havia mais problemas com a troca de posição. Para confirmar os tempos de irrigação foi feito o quarto teste, e utilizaram-se os tempos cronometrados nesse teste para realizar os cálculos de uma hora, e uma hora e meia de irrigação para cada temporizador.

Nota-se que no teste quatro, com o qual se realizaram os cálculos, os sequenciadores apresentaram tempos próximos. O valor médio para esse teste foi de 28min20seg, a maior diferença do tempo em relação à média foi de 2min16seg. Esta variação ocorreu por tratar-se de protótipos feitos artesanalmente, com isso algumas dimensões ficaram diferentes. Outro fator para tal discrepância foram os diferentes tipos de alavancas utilizados em cada sequenciador. Essa diferença contribuiu para que alguns gatilhos desarmassem com mais facilidade, fato que será mais bem explorado

ao comentar-se sobre os sistemas de gatilhos utilizados e qual obteve melhor desempenho.

Com o valor do tempo de desarme do gatilho, pôde-se calcular o tempo necessário para completar uma hora de irrigação (Tabela 2). Definiu-se uma hora de irrigação como tempo na escala, para facilitar os testes em laboratório. Todavia, se poderia ter utilizado outro tempo de irrigação mínimo, para isso bastava na eq. (3), substituir o tempo de 60 minutos pelo tempo desejado. Definido o tempo na escala, calculou-se o volume correspondente ao tempo necessário para completar uma hora, utilizando-se um gotejador com vazão de 2 L.h^{-1} . Para um tubo de 100 mm e área interna de $0,00754296 \text{ m}^2$, obtiveram-se as alturas para inscrevê-las nos temporizadores.

Tabela 2 - Resultados dos cálculos para confecção das escalas em cada temporizador

	Tempo	Volume (m³)	Altura (m)
Temporizador 1	31min40seg	0,001056	0,14
Temporizador 2	33min56seg	0,001131	0,15
Temporizador 3	29min25seg	0,000980	0,13
Temporizador 4	31min40seg	0,001056	0,14

Com os valores das alturas calculadas, marcaram-se as mesmas nos temporizadores correspondentes. Feitos esses procedimentos, iniciaram-se os testes para 1 hora de irrigação (Tabela 3).

Tabela 3 - Tempo de irrigação observado para cada aspersor

	5° Teste	6° Teste	7° Teste	D padrão*	Média
Sequenciador 1	51min16seg	54min05seg	65min00seg	07min21seg	56min50seg
Sequenciador 2	50min51seg	59min47seg	55min27seg	02min39seg	52min23seg
Sequenciador 3	59min29seg	56min36seg	57min24seg	01min12seg	58min47seg
Sequenciador 4	49min17seg	48min17seg	49min13seg	00min02seg	49min16seg

*D padrão= desvio padrão

Para avaliar o tempo de irrigação de uma hora para cada aspersor, realizaram-se três testes. Nota-se que os tempos observados foram diferentes do tempo calculado de

1 hora, e os sequenciadores apresentaram tempos diferentes entre si. Como dito anteriormente, confeccionou-se para cada temporizador um modelo de alavanca, fato que contribuiu para a diferença do tempo de desarme do gatilho entre os sequenciadores. Sendo que o sequenciador 1 foi o protótipo de pior desempenho quando comparados aos outros três. A alavanca desse sistema de gatilho não teve um desempenho satisfatório, por isso descartou-se esse protótipo para futuras aplicações. Conseqüentemente, o sequenciador que apresentou maior desvio padrão do tempo, foi o número 1.

Os sequenciador 2 apresentou desempenho satisfatório quanto ao tempo de irrigação, entretanto, durante os testes esse protótipo foi o que apresentou mais problemas com a troca de posição do êmbolo. Analisando os tempos do sequenciador 3, pode-se observar que este também apresentou tempos satisfatórios de irrigação, entretanto, a alavanca do sistema de gatilho também apresentou problemas, para engatilhar o êmbolo da válvula de 3 vias. Notou-se que o orifício feito na alavanca para servir de ponto de apoio, não podia ficar maior que o parafuso, pois em alavancas com esse tipo de situação (protótipo 3) ocorreram problemas no engatilhamento. Desse modo, descartaram-se esses dois protótipos para futuras aplicações.

Observa-se que o sequenciador que apresentou tempos de irrigação mais constantes foi o protótipo 4, apesar de apresentar um tempo de irrigação inferior ao calculado, esse foi o protótipo de melhor desempenho (Figura 24).

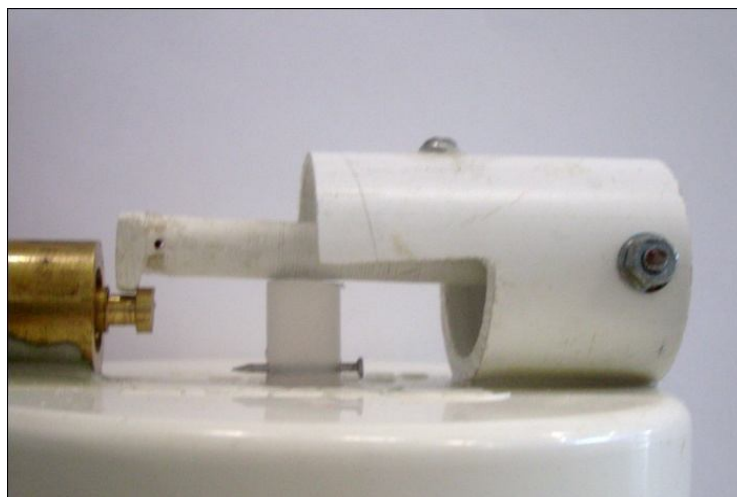


Figura 24 - Protótipo de melhor desempenho

Contudo, essa diferença do tempo de irrigação observado para o cálculo, pode ter ocorrido devido algum erro de marcação do tempo de irrigação na escala do temporizador. Atribui-se o desempenho do protótipo 4 ao formato quadrado levemente biselado, da extremidade da alavanca, que facilitou o deslocamento da mesma.

Após os testes de uma hora de irrigação por aspersor, procedeu-se a um teste de irrigação com tempo de uma hora e meia. Fez-se esse último teste para validar a idéia que o temporizador pode funcionar para qualquer tempo de irrigação. Antes de iniciar o teste, foi necessário marcar na escala, de cada temporizador, a altura correspondente a irrigação, de uma hora e meia. Fizeram-se os cálculos e obtiveram-se para cada temporizador, as seguintes alturas: temporizador 1= 0,28m; temporizador 2= 0,30 m; temporizador 3= 0,26 m e temporizador 4= 0,28 m. Cabe salientar que essas alturas foram somadas com a altura das suas respectivas bóias, e só depois inscritas no temporizador correspondente.

Após esse procedimento foi realizado o teste, os tempos de irrigação para cada aspersor foram: sequenciador 1= 1h38min; sequenciador 2= 1hora29min; sequenciador 3= 1h25min e sequenciador 4=1h34min. Nota-se que os tempos observados foram próximos dos tempos calculados, apresentando uma diferença máxima de 6min55seg (abaixo do tempo de uma hora e meia), que corresponde a 7,68% do tempo calculado. Mas levando em consideração o modo de fabricação dos protótipos, considera-se satisfatório o desempenho da automação sequenciada para uma hora e meia de irrigação, para cada aspersor.

5 CONCLUSÕES

Após a avaliação dos testes realizados com os protótipos, verificou-se que o sistema de sequenciamento de aspersores, mostrou-se como alternativa técnica viável, de automação para irrigação por aspersão em malha.

Nos testes realizados os tempos observados de irrigação, por aspersor, foram próximos aos calculados, demonstrando que o temporizador tem desempenho satisfatório. Para futuras aplicações do sistema, o protótipo com melhor desempenho e que poderia ser construído em escala comercial, foi o sequenciador quatro.

Além da aspersão em malha, o sequenciador poderá ser utilizado em outros sistemas de irrigação, podendo atender a necessidades diferentes das sugeridas nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DA ÁGUA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil:** informe 2010. Brasília, 2010. 76 p.

ALENCAR, C.A.B. Pastagem e cana-de-açúcar irrigadas por aspersão baixa pressão. In: SIMPÓSIO DE PRODUÇÃO DE GADO DE CORTE, 2., 2001, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2001. p. 233-241.

ALENCAR, C.A.B.; CUNHA, F.F. da; RAMOS, M.M.; SOARES, A.A.; PIZZIOLLO, T.A.; OLIVEIRA, R.A. de. Análise da automação em um sistema de irrigação convencional fixo por miniaspersão. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 15, n. 2, p. 109-118, abr./jun. 2007.

AZEVEDO NETTO, J.M. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

BISCARO, G.A. **Irrigação por aspersão**. Dourados: Ed. Universidade Federal de Grande Dourados, 2009. 134 p.

CANSADO, J. C. A. AGRIOLOGIC: **Sistema para Experimentação de Controle Climático de Casas de Vegetação**. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CASTRO, M.C.; FARIA, M.A.; SILVA, A.M. Sistema computacional para a determinação da lâmina ótima econômica em irrigação pressurizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 372-378, 2002 .

CHRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. **ITEM: Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 49, p. 8-13, 2001.

CHRISTOFIDIS, D. Água, Ética, segurança alimentar e sustentabilidade ambiental. **Bahia Análise & Dados**, Salvador, v. 13, n. especial, p.371-382, 2003.

COELHO, G; SILVA, A.M.; SILVA, P.A.M.; LIMA, E.P. Custo de produção da cafeicultura irrigada. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, p. 1534-1540, 2002. Edição especial.

CROSS, H. **Analysis of flow in networks of conduits or conductors**. Cidade: Urbana. University of Illinois, Engineering Experimental Station, 1936. 35 p. (Bulletin, 286).

CRUSCIOL, C.A.C. **Efeitos de lâminas de água e da adubação mineral em duas cultivares de arroz de sequeiro sob irrigação por aspersão**. 1998. 129 p. Tese

(Doutorado em Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 1998.

DRUMOND, L.C.D. **Aplicação de água residuária de suinocultura por aspersão em malha**: desempenho hidráulico do sistema e produção de capim tifton 85. 2003. 120 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2003.

DRUMOND, L.C.D.; FERNANDES, A.L.T. **Irrigação por aspersão em malha**. Uberaba: Ed. Universidade de Uberaba, 2001. 84 p.

FIGUEREDO JÚNIOR, L.G.M.; SILVA, G.O.; COELHO, R.D.; ALVES JÚNIOR, J. Sistemas de automação na Irrigação localizada. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 15, p. 31-36, 2004.

FORMIGA, K.T.M.; CHAUDHRY, F.H. Modelos de análise hidráulica de redes de distribuição de água considerando demanda dirigida pela pressão e vazamentos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 153-162, jun. 2008.

FREIRE, C.R.F. **Análise do trabalho rural no Nordeste do Brasil**. 2000. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

GOMES, H.P. PNL2000: método prático de dimensionamento econômico de redes malhadas de abastecimento de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n° 4, p. 1-108, 2001

GOMES, M.R.; ANDRADE, M.; FERRAZ, F. **Apostila de hidráulica**. Bahia: CEFET/BA, 2008. 65 p. Disponível em: <<http://professormarciogomes.files.wordpress.com/2008/09/apostila-completa.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2011.

GOUTER, I.C.; LUSSIER, B.M.; MORGAN, D.R. Implication of head loss path choice in optimization of water distribution networks. **Water Resources Research**, New York, v. 22, n. 5, p. 819-822, Aug. 1986.

HERNANDEZ, F.B.T.; ALVES JÚNIOR, J.; LOPES, A.S. Irrigação na cultura da pupunha. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Curso sobre cultivo, processamento e comercialização de palmito pupunha**. Londrina, 2001. p. 107-126.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário - Brasil, grandes regiões e unidades da federação**. Rio de Janeiro, 2006. 777 p.

JAMES, L.G.; BLAIR, S.K. Performance of low pressure center-pivot systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, n. 6, p. 1753-57, 1984.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

MACINTYRE, A.J. **Instalações hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara. 1987. 797 p.

MARQUELLI, R.P. **O desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Cerrado Brasileiro**. 54p. Monografia (Especialização em Gestão Sustentável da Agricultura Irrigada)- ISEA-FGV, Ecobusiness School, Brasília, 2003.

MENDONÇA, F.C.; RASSINI, J.B. Manejo da irrigação da alfafa In: FERREIRA, R.P. **Cultivo e utilização da alfafa nos trópicos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2008. cap. 5, p. 127-155.

MENDONÇA, F.C.; CAMARGO, A.C.; STIVARI, A.; LIMA, C.R.C.; FERREIRA, F.C.; AKINAGA, L.; COTI, L.B.; GONÇALVES, L.R.; QUINAGLIA NETO, P. **Dimensionamento de sistemas de irrigação para pastagens em propriedades de agricultura familiar** — São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. 56 p. Disponível em: <<http://www.cppse.embrapa.br/080servicos/070publicacaogratis/boletim-de-pesquisa-desenvolvimento/Boletim10.pdf>> Acesso em: 29 mar. 2011.

MOYA TALENS, J.A. **Riego localizado y fertirrigación**. Tradução de V.F. Grah. 4. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2009. 575 p.

NEGRI, V.J. **Sistemas hidráulicos e pneumáticos para automação e controle: parte II: sistemas pneumáticos para automação**. Florianópolis: UFSC, 2001. 81 p. Disponível em : <<http://www.laship.ufsc.br/PDF/ApostilaPDF/SistHPContAutP2.pdf>>. Acessado em: 30 mar. 2011.

PALMIERI, A.M. **Desenvolvimento de um sistema automatizado de baixo custo para coleta e armazenamento de dados de variáveis climáticas: aplicações no ambiente agrícola**. 2009. 100 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

PEREIRA, G.A. **Sistema experimental de monitoramento e controle para casas de vegetação baseado em redes de controle distribuído LONWORK®**. 2006. 123 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Digitais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia - goteo -microaspersión – exudacion**. Tradução de V.F. Grah. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513 p.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: USP, EESC, 2006. 519 p.

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

RASSINI, J.B.; FERREIRA, R.P.; MOREIRA, A.; TUPY, O.; MENDONÇA, F.C.; BERNARDI, A.C.C. **Cultivo da alfafa**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Alfafa/SistemaProducaoAlfafa_2ed/index.htm>. Acesso em: 21 mar. 2011.

RIBEIRO, M.C. **Estudo sobre racionalização do uso de energia na irrigação**. 2003. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

ROCHA, F.A.; PEREIRA, G.M.; ROCHA, F.S.; SILVA, J.O. Análise da uniformidade de distribuição de água de um equipamento autopropelido. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 1, p. 96-106, 2005

SCALOPPI, E.J. Critério básico para seleção de sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 139, p. 54-62, 1986.

SOUZA, R.O.R.M. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação automatizado para áreas experimentais**. 2001. 85 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SUZUKI, M.A.; HERNANDEZ F.B.T. **Automação de sistemas de irrigação**. Disponível em: <<http://www.agr.feis.unesp.br/curso2.htm>>. Acesso em: 22 mar. 2011.

TARJUELO, J.M. **El riego por aspersión y su tecnología**. Tradução de V.F. Grah. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. 569 p.

TESTEZLAF, R. MATSURA, E.E. FERNANDES, A.T.L. & CÂNDIDO, D.H. **Técnicas, Usos e Impactos**. Capítulo 12: Sistemas automáticos de controle em irrigação. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP, 2002. Disponível em : <<http://webensino.unicamp.br/disciplinas/FA876-055506/apoio/14/Automa.pdf>> Acesso em: 29 de junho de 2011.

VALVERDE, J.A.; PERALTA, I.B; MARÍNEZ, L.C. **Prácticas de laboratorio**: hidráulica. Tradução de V.F. Grah. Valencia: Ed. Univ. Politecnica de Valencia, 2002. 268 p.

ZAZUETA, F. S.; **Irrigation System Controllers**; SS-AGE-32 Agricultural Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service; March, 1993.

ZAZUETA, F. S.; VERGOT, P.; BECK III, H. Use of personal digital assistants (PDAs) in agricultural extension programs. In: **Asian Conference For Information Technology In Agriculture**, 3., 2002, Beijing. Proceedings... Gainesville, Florida: University of Florida, 2002. p. 26-2