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

**Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em
pivô central**

Tadeu Miranda de Queiroz

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

**Piracicaba
2007**

Tadeu Miranda de Queiroz
Engenheiro Agrícola

Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central

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

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

Piracicaba
2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DI VI SÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/ USP

Queiroz, Tadeu Miranda de

Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central/ Tadeu Miranda de Queiroz. - - Piracicaba, 2007.
141 p.; il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Automação 2. Eletrônica 3. Irrigação - manejo 4. Softwares I. Título

CDD 631.7

**“Permi t i da a cópi a t o t a l ou p a r c i a l d e s t e d o c u m e n t o , d e s d e q u e c i t a d a a
f o n t e – O a u t o r ”**

Aos meus pais, Fernando Borges de Queiroz e Maria Amélia Miranda de Queiroz.

Aos meus irmãos Fabrício, Daniel, Bethânia, Elizabeth, João e Osmir.

Dedico

À querida e amada Valquiria

Ofereço

"Faça as coisas o mais simples que você puder, porém não se restrinja às mais simples."

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

- A Deus, pelos dons da paciência, persistência e perseverança;
- Ao meu orientador Tarlei Arriel Botrel, pelos conselhos e ensinamentos durante estes anos de convivência, pela mão estendida nos momentos de dificuldade e pela grande amizade;
- Ao Prof. Dr. José Antonio Frizzone, pelo bom convívio, pelos bons conselhos e sobretudo pela amizade;
- À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP;
- Aos demais professores da ESALQ pelos conhecimentos compartilhados;
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa e taxa de bancada sem a qual não teria sido possível o desenvolvimento deste projeto;
- Aos meus dois grandes amigos e colegas da vida acadêmica, Kelte Resende Arantes e Hudson de Paula Carvalho, pelos bons momentos compartilhados ao longo destes anos de estudo;
- Aos amigos, Sérgio Weine Paulino Chaves, Manoel Januário Júnior e Pablo, com os quais tive a felicidade de conviver;
- Aos meus colegas de sala: Rodrigo, Denis, Maurici, Miguel, Ceres, Robson e Thiago pelas experiências compartilhadas;
- Ao colega de sala e de curso e grande amigo, Rogério P. S. Airoidi, pela imensa contribuição nos nossos projetos acadêmicos;
- Aos amigos Marcos Emanuel e Madaila, Edson Cabral e Lazara, Cezar e Liliosa, Lucio e Antônia por tudo de bom que dividiram comigo ao longo deste período;
- Aos colegas Tales, Rodrigo, Ronaldo, Ralini, Priscila e Michele pela boa convivência ao longo deste curso;
- Ao amigo Gustavo Arruda pelas preciosas dicas em programação Delphi e rádio frequência;
- Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural: Davilmar, Sandra, Beatriz, Helio, Luís, Antônio e Gilmar;
- À todos os que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 DESENVOLVIMENTO.....	12
2.1 O Pivô Central	12
2.2 O Tensiômetro	15
2.2.1 Limitações de uso do tensiômetro	18
2.2.2 Número de tensiômetros e local de instalação.....	21
2.2.3 Curva característica de retenção de água no solo	22
2.2.4 Tensiometria no manejo da irrigação.....	24
2.2.5 O tensiômetro na automação da irrigação.....	26
2.3 Eletrônica na agricultura.....	28
2.4 Sistemas de controle	29
2.4.1 Sensores	30
2.4.2 Controladores de irrigação.....	32
2.5 Microcontroladores e Microprocessadores	32
2.5.1 Basic Step	33
2.6 Aquisição de dados e controle	36
2.6.1 O uso do microcomputador.....	36
2.6.2 “Interfaces” de comunicação	38
2.6.2.1 “Interface” serial	38
2.6.2.2 “Interface” paralela.....	39
2.6.2.3 “Interface wireless”.....	42
2.7 Material e métodos.....	46
2.7.1 Descrição do material utilizado	46
2.7.2 Teste de oscilação do par “encoder/decoder”	49
2.7.3 Montagem dos Módulos RF	50
2.7.3.1 Circuito de controle remoto	51
2.7.3.2 Circuito de transmissão e recepção de dados.....	55
2.7.4 Circuito identificador de posição	58
2.7.5 Circuito comutador de sinal	63
2.7.6 Percentímetro automático microprocessado	64
2.7.7 “Interface” PivoRF	66
2.7.8 Fonte regulada.....	68
2.7.9 Teste das cápsulas dos tensiômetros.....	69
2.7.10 Calibração dos transdutores de pressão	70
2.7.11 Teste de transmissão de dados via radiofrequência	76
2.7.12 Desenvolvimento dos “softwares” para o computador.....	78
2.7.12.1 PivoRFusuario	79
2.7.12.2 PivoRFadministrador.....	83
2.7.12.3 PivoRFmonitoramento.....	85
2.7.13 Desenvolvimento dos “softwares” para o Basic Step.....	86
2.7.13.1 Aplicativo LeA/Dtensiometro.....	86
2.7.13.2 Aplicativo LePosicao.....	87
2.7.13.3 Aplicativo Percentimetro	88

2.7.14 Teste de geração de arquivos no formato XLS.....	89
2.7.15 Simulação da utilização do “software” e do “hardware”	90
2.7.16 Teste de durabilidade de baterias e eficiência dos circuitos RF	93
2.7.17 Avaliação da influência do comprimento do cabo de sinal dos transdutores	93
2.8 Resultados e discussão.....	94
2.8.1 Oscilação do par “encoder/decoder”	94
2.8.2 “Hardwares” desenvolvidos.....	94
2.8.2.1 Circuito de controle remoto	95
2.8.2.2 Circuito de Transmissão de dados	97
2.8.2.3 Circuito identificador da posição.....	99
2.8.2.4 Circuito comutador de sinal.....	100
2.8.2.5 Percentímetro automático microprocessado	100
2.8.2.6 Fonte regulada.....	101
2.8.2.7 “Interface” PivoRF	101
2.8.3 Teste das cápsulas dos tensiômetros.....	102
2.8.4 Calibração do transdutor de pressão	103
2.8.5 Alcance dos módulos de rádio frequência	105
2.8.6 Aplicativos desenvolvidos para o computador	106
2.8.6.1 PivoRFusuario	110
2.8.6.2 PivoRFadministrador.....	115
2.8.6.3 PivoRFmonitoramento.....	118
2.8.7 Aplicativos para o Basic Step	119
2.8.8 Duração das baterias	120
2.8.9 Comprimento dos cabos.....	120
3 CONCLUSÕES	121
REFERÊNCIAS.....	122
ANEXOS	129

RESUMO

Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central

Com o objetivo de desenvolver um sistema de automação de modo a propiciar a irrigação de precisão em equipamentos do tipo pivô central, foram construídos “softwares” e “hardwares” na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo - ESALQ/USP, pertencente ao campus de Piracicaba. O presente projeto foi feito em duas etapas, sendo a primeira realizada em Piracicaba, SP, onde o sistema foi desenvolvido, construído e testado e a última em Barra do Bugres, MT, onde se realizou um experimento em laboratório para averiguar o seu funcionamento. As avaliações foram feitas em laboratório, exceto o teste de alcance dos rádios. Foi construído um aparato para simular o funcionamento de um pivô central. No desenvolvimento deste projeto foram utilizados módulos de rádio frequência de 315 MHz e 433,9 MHz, microcontroladores Basic Step, displays de cristal líquido, circuitos integrados, componentes eletrônicos discretos, conectores, cabos e fios, material e ferramentas para confecção artesanal de placas de circuito impresso e um microcomputador. Ao longo de todo o trabalho foram desenvolvidos 12 circuitos (“hardwares”) sendo 10 para a “interface” com o computador e 2 para acionamento e transmissão dos dados dos tensiômetros. Todos os circuitos foram testados individualmente e em conjunto. Ao final os 10 circuitos de “interface” com o computador foram agrupados em uma única placa de circuito impresso, a qual foi utilizada nas simulações feitas em Barra do Bugres, MT. Os aplicativos (“softwares”) desenvolvidos foram 6, sendo três para o computador e três para os microcontroladores utilizados. Para o desenvolvimento dos aplicativos computacionais utilizou-se a linguagem Delphi 3 da Borland, já os aplicativos para o Basic Step foram desenvolvidos em linguagem TBasic. Não se detectou falhas nos aplicativos desenvolvidos para os microcontroladores. O aplicativo desenvolvido para o computador foi denominado PivoRF e apresenta três versões: usuário, administrador e monitoramento. A versão usuário é a mais robusta e de aplicação direta no campo. A versão administrador tem a única função de gerar arquivos de dados para a alimentação da versão usuário, já a versão monitoramento serve para monitorar continuamente um determinado setor de irrigação, tendo aplicação mais voltada para a pesquisa. Testes foram realizados para avaliar a alcance dos rádios, a eficiência de transmissão de dados e a capacidade de controle do pivô central. Os resultados obtidos revelaram que os módulos de rádio frequência utilizados apresenta curto alcance, não sendo estes, indicados para uma aplicação real em sistemas pivô central. Quando avaliado a distâncias inferiores a 50 metros o sistema se mostrou eficiente para transmissão de dados, não apresentando falhas. A versão usuário foi testada exaustivamente, mostrando funcionamento adequado nos mais de 300 testes realizados. Com base nos resultados obtidos conclui-se que, a tecnologia desenvolvida tem grande potencial para aplicação prática, facilitando o manejo da irrigação. Entretanto, é necessário a utilização de módulos de rádio frequência com alcance maior do que os que foram utilizados, o que atualmente se encontram facilmente disponíveis no mercado.

Palavras-chave: Automação; Eletrônica; Programação; Manejo da irrigação; Rádio frequência

ABSTRACT

Development of an automatic system for precision irrigation with center pivot

In order to develop an automation system so as to provide precision irrigation through center pivot equipment, softwares and hardwares were built at the Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, University of Sao Paulo – ESALQ/USP, within the Piracicaba campus. This project was carried out in two stages, the one performed in Piracicaba, state of Sao Paulo, in which the system was developed, built and tested, and the second one in Barra do Bugres, state of Mato Grosso (MT), in which a laboratory experiment was performed to verify the operation. The evaluations were carried out in laboratory, except the radio range test. An apparatus to simulate a center pivot operation was built. Along the experiment, one used radio-frequency operating on 315 MHz and 433.9 MHz, liquid crystal displays, integrated circuits, discrete electronic components, connectors, cables and wires, material and tools for handmade printed circuit boards and a microcomputer. Along the entire work 12 circuits (hardwares) were developed, with 10 for computer interface and 2 to drive and transmit the tensiometer data. All circuits were tested both individually and grouped. At the end, all 10 computer interface circuits were grouped into a single printed circuit board, which was used in simulations in Barra do Bugres, MT. Six softwares were developed, three of which for the computer and three for the microcontrollers used. For computer software development one used Borland’s Delphi 3, while the Basic Step softwares were developed in TBasic. No failures were detected in any of the softwares developed for the microcontrollers. The software developed for the computer was named PivoRF and presents three versions: user, administrator and monitoring. The user version is the more robust and destined for direct field application. The administrator version has the sole function of generating data files for the administrator version input; as for the monitoring version, it continually monitors a given irrigation section, and its application is more suitable for research. Tests were carried out to evaluate radio range, data transmission efficiency and center pivot control capacity. The results revealed that the radio-frequency moduli have short range and are not suited for real application in center pivot systems. Evaluated at below 50-meter distances the system proved to be efficient for data transmission with no failures. The user version was exhaustively tested, and operated adequately in over 300 tests. Based on the results, one verifies that the technology developed has a great potential for practical use, thus making irrigation management easier. However, radio-frequency moduli with higher range than those used are required, and those can be easily found in the market today.

Keywords: Automation; Electronic; Program; Management of irrigation, Radio frequency

1 INTRODUÇÃO

Desde meados do último século o homem evoluiu muito em seus conhecimentos científicos, principalmente no que diz respeito à eletrônica e à informática. A corrida armamentista impulsionada pela famosa Guerra Fria e liderada pela União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS, hoje Rússia) e Estados Unidos da América (EUA) contribuiu muito para o desenvolvimento tecnológico.

Uma das conseqüências da evolução científica sofrida pelo homem foi a descoberta da lógica Booleana aplicada aos circuitos elétricos, a qual deu origem à eletrônica digital onde pulsos elétricos são convertidos em números e vice-versa. O computador foi inventado, melhorado, miniaturizado e popularizado graças à descoberta dos semicondutores e a posterior invenção do transistor. Circuitos digitais foram implementados em microscópicos “pacotes” de silício (Microchips) para as mais diversas aplicações.

Com o fim da corrida armamentista todo o arsenal tecnológico gerado se tornou disponível. Novas aplicações surgiram. A agricultura foi amplamente beneficiada. Máquinas e implementos comandados por satélites circulam pelos campos de produção de grãos, sensores monitoram variáveis climáticas a todo instante em muitos pontos do globo terrestre, sistemas automáticos controlam e comandam centrais de distribuição de água. Tudo isso com uma desvantagem: a grande maioria dos equipamentos, sensores, controladores, “softwares” e “hardwares” são importados, portanto desenvolvidos para condições de solo, clima, e realidade cultural do país de origem, diferentes, portanto, daquelas encontradas no Brasil.

Caminhando lado a lado com a evolução está a degradação ambiental. A agricultura é a atividade que mais consome água em todo o planeta, representando cerca de 60% do total. Um dos vilões desta História é a irrigação, que tem tido a fama de ser o maior responsável por esse consumo. Por outro lado, a irrigação representa uma alternativa tecnológica para contornar o problema do déficit hídrico das plantas, visando assegurar o aumento da produtividade tanto em quantidade como em qualidade e ainda, permite a produção de alimentos na entre-safra e até em ambientes áridos, como, por exemplo, no Nordeste brasileiro.

O Brasil vive um momento histórico que parece ser o marco inicial da “Revolução Hídrica” nacional, onde começa a se exigir outorga para uso da água e até mesmo o pagamento pela vazão

recalcada. O que já não é mais novidade, pois, nos países ditos “desenvolvidos”, este processo ocorre com naturalidade.

Sistemas operando com baixa eficiência desperdiçam muita água. A automação é umas das ferramentas possíveis de se usar para tentar minimizar as perdas. Muitos sistemas automáticos estão funcionando em campos de irrigação brasileiros. Todavia, o que se vê na prática, são controladores importados, e geralmente dedicados, que controlam apenas os mecanismos de aplicação da água, não considerando regras de manejo para a tomada de decisão.

Encontram-se citações a sistemas automáticos de aquisição de dados referentes ao conjunto solo-planta-atmosfera como índices de tomada de decisão do momento da irrigação. Entretanto, não é comum sistemas que operem em malha fechada unindo no mesmo pacote a automação da aquisição de dados e o controle, ou seja, a automação da aplicação e do manejo.

A indústria de equipamentos de irrigação tem desempenhado o seu papel. A cada dia novos sistemas são lançados no mercado para atender as mais diversas necessidades. O ponto fraco da cadeia da irrigação é o manejo inadequado por uma causa muito mais cultural do que técnica. O agricultor, brasileiro não está acostumado a fazer o manejo do seu sistema de irrigação adequadamente fazendo-o de maneira empírica.

O pivô central é um sistema que abrange grandes áreas e demanda muita água principalmente quando comparado a sistemas de aplicação localizada, por isso é sempre o principal alvo da crítica. No Brasil existem aproximadamente 3 milhões de hectares irrigados. Destes, 20% são irrigados com o sistema de aspersão do tipo pivô central que cobre uma área, aproximada, de 520 mil hectares.

Com o intuito de facilitar e melhorar o manejo a pesquisa tem buscado alternativas no campo da eletrônica, e tem encontrado soluções para os mais diversos problemas. Portanto, o desenvolvimento de alternativas de controle automático e de baixo custo deve ser considerada prioritária.

Neste sentido, a pesquisa deve desempenhar papel fundamental e este trabalho visa buscar soluções no campo da eletrônica, utilizando-se de componentes disponíveis no mercado brasileiro com os objetivos de desenvolver e testar:

- * “software” para aquisição de dados e controle automático da irrigação em pivô central;
- * “hardware” para comunicação do computador com sensores;
- * comunicação sem fio de tensiômetros com o computador via radiofrequência;

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 O Pivô Central

O pivô central, máquina de irrigar, foi inventado em 1947 no Estado Americano do Colorado por Frank Zibarch e foi patenteado em 1949 (TOMAZELA, 1991). Ainda, segundo o mesmo autor somente trinta e dois anos mais tarde, em 1979, é que foi instalado o primeiro pivô em território brasileiro, no município de Paracatu/MG. Rodrigues (1999) comenta que o período de maior demanda por este equipamento se deu em 1986, quando foram comercializadas cerca de 731 unidades sendo que de 1988 a 1997 as vendas oscilaram muito, atingindo um mínimo de 250 unidades em 1990.

Segundo Vilela (2002) os primeiros pivôs eram máquinas simples acionadas por turbinas hidráulicas e sua uniformidade de aplicação de água sobre a superfície do solo dependia do relevo e da extensão do pivô. Atualmente, o deslocamento do pivô é feito por motores elétricos acoplados em cada torre e a incorporação de acessórios permitem a utilização desses equipamentos nas mais diversas situações.

De acordo com Rodrigues (1999), o sistema consiste de uma lateral móvel com diversos bocais de distribuição de água, que podem ser aspersores de impacto (rotativos) ou “sprays” (fixos ou rotativos), instalados em espaçamentos regulares. Esta linha lateral é suportada longitudinalmente por diversas torres, que se movimentam sobre rodas ao redor do seu ponto central ou ponto pivô. A tubulação entre as torres (vãos) é suportada por uma estrutura metálica em treliça e tirantes. Esta estrutura é responsável pela manutenção dos tubos com os emissores a uma determinada altura do solo. A ligação entre os vãos é feita com articulações flexíveis, o que torna o pivô um equipamento capaz de operar em topografia irregular.

Em cada torre, na parte inferior tem um motor elétrico de baixa potência acoplado a uma caixa redutora com eixos cardam e na parte superior, existe uma caixa de controle elétrico do motor. O acionamento do motor é feito através de um dispositivo mecânico acoplado à torre que mede o desalinhamento de cada vão. A velocidade de revolução de um pivô central é controlada pela última torre, na forma de percentagem de controle, localizado no ponto do pivô.

O deslocamento da linha lateral deste equipamento no campo é comandado pelo andamento da torre externa. Supondo, inicialmente, que todas as torres estejam alinhadas e apenas a última

se movimente, o acionamento da torre subsequente se processa quando o vão em movimento se deflete em relação aos demais. Este processo se repete entre todos os vãos adjacentes, promovendo, assim, a movimentação de toda a linha de irrigação pelo funcionamento intermitente dos motores das torres.

Uma vez que a linha lateral do pivô opera em círculos, cuidados especiais devem ser tomados no projeto de abrangência do sistema, para se ter uma distribuição de água o mais uniforme possível sobre a área irrigada. Deste modo tenta-se reduzir as perdas provocadas pelo excesso ou déficit hídrico. Para tanto, é preciso ter em mente que os “sprays” ou aspersores localizados próximos ao centro do ponto pivô cobrem áreas menores do que aqueles próximos ao extremo da linha o que significa que a descarga de água dos primeiros aspersores na linha lateral deve ser menor, crescendo em direção à extremidade. Assim, cada emissor tem um local específico, não podendo ser trocado por outro de outra posição.

Assume-se que o pivô central tem capacidade infinita de aplicar diferentes lâminas na área a ser irrigada podendo-se, então, dividir essa área em parcelas como numa pizza em fatias (XAVIER et al. 2004) e a partir de um único dispositivo (Percentímetro) pode se controlar a lâmina aplicada em cada fatia.

Segundo Favetta (1998) a área média irrigada por pivôs centrais no Brasil é de aproximadamente 64 ha. Para tal afirmação o autor considerou informações de 89 pivôs centrais distribuídos em 8 estados brasileiros.

Segundo Christofidis (2002) o Brasil irriga 2.089.401 ha, sendo 651.548 ha irrigados através do sistema pivô central. A região Sudeste participa deste montante com 362.618 ha (55,65 %), sendo liderado pelo estado de São Paulo com 254.360 ha (39 %) irrigadas por pivô central.

Considerando a área média irrigada por pivô relatada por Favetta (1998) e a área irrigada por esse sistema no Brasil, citada por Christofidis (2001), Vilela (2002) estimou que o número de pivôs em operação no país deve estar compreendido entre 6.936 e 8.800 unidades.

Segundo Tomazela (1991), muita ênfase tem sido dada a sistemas de aspersão, do tipo pivô central, em eventos técnicos científicos na área de irrigação, buscando-se obter explicações sobre como conduzir culturas no que se refere a preparo de solo, controle de pragas e doenças, aplicação de fertilizantes e defensivos, além da especial atenção ao manejo do sistema quanto à distribuição da água nos solos sob seu domínio de cobertura. O autor também nota um grande distanciamento entre o produtor rural (consumidor), os fabricantes do sistema e as instituições de

pesquisa, talvez em função de serem tais equipamentos oriundos de tecnologias importadas e já acabadas.

Longo (1991) cita que o desempenho do pivô central, em condições de campo, é avaliado, basicamente, em função da uniformidade de distribuição e da eficiência de aplicação de água. O autor afirma que a velocidade do vento é o elemento climático que maior influência exerce sobre a uniformidade de distribuição de água e, juntamente com a temperatura e a umidade relativa do ar, favorecem a perda por evaporação, diminuindo a eficiência de aplicação. A contribuição nessas perdas pode variar conforme o tamanho das gotas produzidas pelos aspersores e a distância percorrida por elas, desde o seu ponto de formação até a superfície irrigada.

Em geral a eficiência de aplicação (E_a) da irrigação por aspersão varia durante o dia entre 60 % e 75 %, no entanto, irrigando-se a noite ela pode chegar a valores próximos dos 90 % (BELTRÃO, 1999).

O manejo da irrigação, quando feito de forma inadequada, acarreta perdas de água, energia, insumos, tempo, etc e reflete diretamente na produtividade da lavoura e, conseqüentemente, no lucro do agricultor. Elas, muitas vezes, não podem ser detectadas com uma simples observação do funcionamento do sistema de aspersão da água. Com isso, muitos detalhes passam despercebidos e as perdas, que parecem ser insignificantes, vão se somando e ao final de um ciclo de cultivo, podem até comprometer a viabilidade econômica do sistema de irrigação. Portanto, avaliações periódicas devem ser feitas a fim de se detectar possíveis falhas no sistema.

Vilela (2002) comenta que o pivô central é o sistema de irrigação por aspersão mais automatizado que existe no mercado. Esta automação, ainda segundo o autor, pode variar desde um simples acessório a até controladores que permitem o seu acionamento à distância por meio de ondas de rádio ou telefone celular.

A automação observada, na maioria dos casos, limita-se ao controle de mecanismos que permitem o movimento automotor da lateral. Mas, já existe disponível no Brasil pivôs com painéis digitais que permitem a subdivisão da área irrigada em parcelas na forma de fatias, conforme foi denominado de Xavier et al. (2004). A largura de cada parcela é definida no painel em unidades de ângulo, a partir de uma referência fixa. Esse tipo de pivô permite a aplicação de lâminas diferentes em cada fatia. Neste sentido, dispositivos de monitoramento do sistema solo-planta-atmosfera podem ser utilizados para a estimativa da lâmina ideal em cada fatia irrigada e a automação do sistema pode ser implementada em malha fechada.

Sistemas de automação que visam a economia de energia no pivô central tem sido desenvolvidos nos últimos anos. Cita-se o exemplo de Azevedo (2003) que utilizou mapas planialtimétricos para definir regiões de topografia semelhante e assim controlar a rotação da motobomba, através de inversor de frequência, ajustando a pressão de serviço nos pontos críticos. O autor verificou, para os equipamentos avaliados, redução do consumo de energia que, em média, variou de 15,9 % a 32,9 %.

Sistemas automáticos de controle da lâmina aplicada foram desenvolvidos nos Estados Unidos da América. Para isso foram utilizadas duas válvulas solenóides em cada difusor o que permitiu o ajuste automático de até 3 vazões em cada emissor. O sistema desenvolvido utiliza comunicação de dados via rede elétrica – “Power Line Communication” (PLC) - para o controle das diferentes válvulas. O resultado foi a melhoria na distribuição da água ao longo do raio irrigado.

A associação de tecnologias de permitem o controle da lâmina irrigada tanto no sentido radial quanto no perimetral constitui uma alternativa altamente desejável visto que assim poderá se fazer, também, uma irrigação de precisão aplicando a quantidade de água necessária em cada área homogênea, definida por mapas de classificação do solo e cultura.

2.2 O Tensiômetro

Segundo Faria e Costa (1987), o tensiômetro tem sido estudado desde a introdução do conceito de potencial matricial feito por Buckingham em 1907, seguido pelo início do seu desenvolvimento por Gardner et al. em 1922 e por aperfeiçoamentos realizados por Richards em 1928, Heck em 1934 e Rogers em 1935. Hook (1987 apud ASSIS JUNIOR, 1995) comenta que embora modificações tenham sido feitas no sentido de aumentar a confiabilidade de suas respostas, simplificar as observações e facilitar a instalação e o manejo, as características externas do tensiômetro pouco mudaram ao longo do tempo. Ainda segundo o mesmo autor, o tensiômetro é uma ferramenta barata de pesquisa e, segundo Faria e Costa (1987), este aparelho tem ampla utilização em áreas irrigadas, havendo, porém, a necessidade de divulgação e adaptação desta técnica em locais onde se iniciam práticas de irrigação.

Segundo descrição de Camargo; Crohman e Camargo (1982), o tensiômetro consiste basicamente de um tubo, geralmente de PVC, uma cápsula de cerâmica porosa, rolha de borracha

e um elemento sensível indicador da tensão existente dentro do mesmo. Seu princípio de funcionamento é bastante simples: a cápsula é ligada a um manômetro por um tubo num sistema, cheio de água, hermeticamente fechado. Quando a cápsula porosa do tensiômetro é posta em contato com o solo não-saturado, este succiona a água provocando uma queda de pressão ou tensão dentro do sistema. Essa tensão pode ser medida pelo manômetro, obtendo-se, dessa forma, o potencial matricial da água no solo e, indiretamente, o teor de água.

O tensiômetro é um instrumento que serve para a determinação do momento oportuno de irrigação, através da medida indireta da umidade do solo e tem sido usado para esse fim por ser um aparelho simples e de fácil utilização, apresenta baixo custo, não requer calibração ou qualquer fonte de potência e fornece leituras instantâneas, desde que devidamente instalados e manejados (FARIA; COSTA, 1987; ASSIS JUNIOR, 1995). Seu nome advém do fato de se utilizar, também, a palavra tensão para designar o potencial matricial da água no solo. A diferença é que o termo tensão já inclui em seu significado o valor numérico negativo de potencial mátrico (SAAD; LIBARDI, 1992^b).

Atualmente, tanto o mercado nacional quanto o internacional, fornecem diferentes modelos e marcas de tensiômetros. Entretanto, trabalhos (JUNQUEIRA; OLIVEIRA e VALADÃO 1998; OLITA, 1976) realizados no Brasil mostram que a construção de tensiômetros artesanalmente leva a um bom resultado com a redução de até 60 % no custo do mesmo. Junqueira; Oliveira e Valadão (1998) avaliaram o desempenho de cápsulas e vacuômetros nacionais e verificaram que o funcionamento destes foi adequado sendo recomendados para a construção artesanal de tensiômetros.

Existem muitos modelos de manômetros empregados na fabricação de tensiômetros. O manômetro de coluna de mercúrio é o mais antigo. Heck (1934), um dos primeiros usuários deste aparelho, mostra em seu trabalho uma foto do tensiômetro utilizado, o qual, era instrumentado por um manômetro de coluna de mercúrio do tipo tubo em “U”.

O manômetro de mercúrio é considerado o mais preciso e, portanto, indicado para aplicações em trabalhos de pesquisa (padrão) e é ainda utilizado em larga escala (BERGAMASCHI et al., 2004; BIANCHI, 2004; ANGELOTTI NETTO; FERNANDES, 2005).

Saad e Libardi (1992^b) introduziram o conceito de tensiômetros de faixas para auxiliar o irrigante na tomada de decisão. O método proposto por estes autores consiste em dividir a coluna de mercúrio representativa dos 80 % da Capacidade de Água Disponível (CAD) em faixas

coloridas (azul, verde, amarela e vermelha) que indicam o estado de umidade do solo. Deste modo não há necessidade do irrigante efetuar leituras e calcular a umidade do solo. A decisão do momento de irrigar é tomada com base na cor que indica o momento da irrigação. Segundo os autores, a metodologia foi bem aceita pelos irrigantes que realizaram o manejo de forma satisfatória.

Entretanto, a utilização do mercúrio como líquido manométrico tem sido vista como um problema do instrumento, uma vez que, associado ao uso do mercúrio, pode-se ter danos à saúde de quem manuseia, risco de poluição ambiental e dificuldade de montagem, manutenção e operação (ASSIS JUNIOR, 1995), além de, segundo Camargo; Crohman e Camargo (1982), ser dispendioso. Acrescenta-se ainda a dificuldade de se conseguir comprar mercúrio líquido atualmente.

Depois da coluna de mercúrio o manômetro mais conhecido e utilizado é o tipo Bourdon, também chamado de vacuômetro metálico. Este apresenta, em relação ao mercúrio, a vantagem de possibilitar a leitura da tensão diretamente na escala do mostrador indicado por um ponteiro sem a necessidade da utilização de equações de conversão.

Brasil et al. (2003) avaliaram o desempenho de vacuômetros de Bourdon utilizados em tensiômetros no manejo da irrigação. Os resultados encontrados pelos autores demonstraram que estes vacuômetros são precisos, com alto grau de exatidão e que possuem resolução equivalente ao tensiômetro de mercúrio, principalmente no intervalo de medidas utilizadas para o manejo da irrigação. Segundo Assis Júnior (1995), umas das limitações da utilização de tensiômetros equipados com medidores de pressão do tipo Bourdon é o custo, pois quando usado em grande quantidade, é alto. O autor afirma que esse tipo de medidor de pressão danifica-se com facilidade e requer cuidadosa manutenção.

Outros dispositivos, que não a coluna de mercúrio e o manômetro de Bordon, são utilizados como indicadores manométricos. Thiel et al. (1963) construíram um transdutor de pressão para medir pressões hidrostáticas em meio poroso. Marthaler et al. (1983) construíram e utilizaram um sistema tensiômetro/transdutor, o qual consiste de um transdutor de pressão conectado ao tensiômetro através de uma agulha de seringa, tendo um registrador digital. A agulha, quando introduzida através de uma tampa de borracha, presente na extremidade superior do tensiômetro, conecta uma pequena câmara deixada abaixo da tampa de borracha ao elemento sensor do transdutor. A pressão no interior da câmara equilibra-se com a pressão da água no interior do

tensiômetro, a qual é mostrada em um registrador digital. Para os autores, o uso desse tipo de transdutor permite uma manutenção mais rápida e mais fácil do instrumento do que quando se usa manômetro de mercúrio, além de diminuir a influência da temperatura e a chance de danos mecânicos. O aparelho desenvolvido por Marthaler et al. (1983) hoje é conhecido, no Brasil, por tensímetro digital de punção ou simplesmente tensímetro.

Outra maneira de estimar a tensão em tensiômetros foi descoberta por Camargo; Crohman e Camargo (1982) quando verificaram a existência de uma relação entre o tamanho da câmara gasosa no alto da coluna de líquido no interior do tensiômetro e a tensão da água no solo. Os autores mediram, ao mesmo tempo, a tensão da água no solo através de manômetros de mercúrio e a altura da câmara de ar que se formava. Foi encontrada uma relação hiperbólica entre a altura da câmara de ar e o potencial mátrico. Villa Nova et al. (1989) fez uma análise teórica do método de desenvolvido por Camargo; Crohman e Camargo (1982) considerando o efeito da temperatura. Foi proposto um modelo matemático para o cálculo do potencial mátrico a partir da altura da câmara no momento da leitura, levando em conta a câmara deixada inicialmente no tensiômetro. Villa Nova et al. (1992) compararam o tensiômetro de câmara de ar com manômetro de mercúrio em dois tipos de solos, no laboratório, e observaram equivalência entre os resultados dos dois tipos de tensiômetros.

Teixeira e Coelho (2005) desenvolveram e calibraram um tensiômetro eletrônico de leitura automática utilizando para isso transdutores de pressão. Diferentemente do aparelho de Marthaler et al. (1983) que consiste de uma unidade de leitura portátil acoplável ao tensiômetro, Teixeira e Coelho (2005) propuseram a utilização de um sistema de medição da tensão para cada tensiômetro, o que permite a aquisição de dados oriundos de vários pontos ao mesmo tempo com a vantagem se poder fazê-lo via acesso remoto.

2.2.1 Limitações de uso do tensiômetro

O tensiômetro é um equipamento composto de uma câmara hermeticamente fechada que contém água e ar. Para as medidas do potencial admite-se que não há variação da temperatura da câmara ao longo do dia. Entretanto, muitos trabalhos (NYHAN; DRENNON, 1990; HUBBELL; Sisson, 1998; entre outros) mostram que há considerável variação da tensão em função da temperatura.

Para tensiômetros de leitura manual, recomenda-se que as leituras sejam feitas preferencialmente pela manhã ou sempre no mesmo horário. Mas, com o advento da automação da aquisição de dados de tensiômetros no campo em tempo real, pode se fazer, também, um monitoramento da temperatura (HUBBELL; SISSON, 1998; TEIXEIRA; COELHO, 2005).

Camargo; Crohman e Camargo (1982), adotando dois horários de leituras (9 e 16 horas), verificaram que os dados de tensão foram ligeiramente afetados. Observaram que às 16 horas as tensões se apresentaram, em geral, inferiores às verificadas às 9 horas. Apenas no início das determinações, enquanto as tensões se achavam bastante baixas, não se observaram redução das tensões nas leituras da tarde. As curvas de regressão apresentam pequena, mas consistente, subestimativa das tensões. Comparando-se as leituras das 16 horas com as das 9 horas, houve variações de até 2,5 kPa.

Para reduzir as influências da temperatura na cápsula e da hora de leitura, é recomendável o uso de tubo de baixa condutividade térmica, como é o caso do plástico. Embora a influência na hora da leitura sobre os dados de tensão possa ser considerada pequena, quase desprezível, é recomendável fazer as leituras aproximadamente na mesma hora (CAMARGO; CROHMAN e CAMARGO, 1982; ASSIS JUNIOR, 1995).

Outra limitação atribuída ao tensiômetro é o limite de leitura, principalmente para solos argilosos. Bernardo (1995) recomenda valores de tensão para a faixa de trabalho do tensiômetro de 0 a 75 kPa e cita que, neste patamar o tensiômetro cobre 70 % da água disponível em solos arenosos e 40 % em solos argilosos. Valores semelhantes para a faixa de trabalho são recomendados por Faria e Costa (1987). Estes valores correspondem à faixa ótima para desenvolvimento da maioria das culturas, cobrindo de 25 % a 75 % da água disponível no solo, dependendo da sua textura e estrutura.

Admite-se que o tensiômetro funcione cheio de água, sem a presença de bolhas de ar e de câmara gasosa no alto do tubo, mas, segundo Calbo e Silva (2003), o embolismo ou a entrada de ar dentro do tensiômetro, tem limitado o uso dos mesmos à tensões entre 0 e 100 kPa. Para evitar ou reduzir os efeitos deste fenômeno recomenda-se a verificação da estanqueidade do aparelho, principalmente no mecanismo de fechamento do mesmo.

Outro problema observado é a formação de bolhas de ar devido à evaporação da água no interior do tensiômetro com a diminuição da pressão interna. REICHARDT e TIMM (2004) recomendam a utilização de água desaerada para o enchimento dos tensiômetro e a fluxagem

periódica dos mesmos. No campo, torna-se praticamente impossível a utilização de água com a característica citada. Na prática pode-se utilizar qualquer água, desde que esta esteja limpa e livre de partículas em suspensão. Uma boa recomendação é a utilização de água potável.

Camargo; Crohman e Camargo (1982), quando trabalharam com o tensiômetro de leitura direta, verificaram que o emprego de água fervida, para expelir o ar dissolvido e evitar a formação indesejável de câmara de ar no alto do tubo pode ser considerada desnecessária. Segundo os autores, a água comum de torneira pode ser usada sem problemas.

Todas as recomendações de utilização de água fervida, destilada ou desaerada, tem origem no tensiômetro de coluna de mercúrio, pois, este é drasticamente afetado pela formação de bolhas de ar, principalmente quando estas se acumulam no tubo do manômetro acarretando a interrupção da coluna líquida e impossibilitando a leitura. Todavia, com o advento de tensiômetros eletrônicos, como o de punção de digital, por exemplo, este efeito é anulado conforme constatação de Camargo; Crohman e Camargo (1982).

Um outro cuidado a ser tomado, é com relação à área de contato da cápsula com o solo a qual pode afetar o perfeito funcionamento do tensiômetro, sendo também, uma limitação. Neste caso, o tamanho da cápsula tem influência direta. Hendrickx; Nieber e Siccana (1994) avaliaram o efeito do tamanho da cápsula porosa do tensiômetro sobre a variabilidade dos valores de potencial mátrico medidos, utilizando três tamanhos de cápsula (4,8; 42,3 e 88,3 cm²) de área superficial externa. O aumento no tamanho da cápsula reduziu a variabilidade nos valores de potencial, sugerindo que a cápsula de tamanho intermediário (a mais usada na prática) ainda é muito pequena, causando variabilidade relativamente alta, devendo ser substituída por cápsulas maiores.

A umidade do solo na condição de equilíbrio a uma dada tensão é maior na curva de “secamento” do que na curva de “molhamento”. Esta diferença é devido à histerese e traz sérios problemas para a descrição matemática do fluxo de água no solo. Segundo Reichardt (1975) o problema pode ser contornado parcialmente utilizando a curva de molhamento quando se descreve fenômenos de molhamento como, por exemplo, infiltração e curva de secamento em fenômenos de secamento, como no caso de evaporação. Quando os dois fenômenos ocorrem simultaneamente, como é o caso do uso do tensiômetro, para manejo da irrigação, o problema torna-se sério. Devido à dificuldade de medição na maioria das vezes a histerese precisa ser desconsiderada.

2.2.2 Número de tensiômetros e local de instalação

Pacheco et al. (1994) trabalharam em terra roxa estruturada em Piracicaba/SP com o objetivo de melhorar a caracterização das variabilidades temporal e espacial do potencial mátrico da água no solo. Os autores utilizaram tensiômetros de coluna de mercúrio para a determinação desse potencial e concluíram que, para obter um valor médio dentro de 10% do valor esperado, cinco pontos de medição são suficientes.

Xavier et al. (2004) desenvolveu um modelo para cálculo de lâminas de irrigação em pastagem irrigada sob pivô central. Na parcela de controle, a lâmina a ser irrigada foi obtida com auxílio de dados de tensão da água no solo, coletados através de baterias de tensiômetros a diferentes profundidades. Não foi comentada a profundidade de instalação dos instrumentos nem o número deles por bateria, mas foram adotados 5 pontos de medida da tensão.

Segundo Faria e Costa (1987), para o sistema pivô central deve-se instalar uma bateria no ponto inicial de rotação, outra a 180° de giro e uma terceira um pouco antes da posição final de giro. Os aparelhos devem ser localizados entre a segunda e a terceira torre externa. Para isso, deve-se escolher um local vegetado com a cultura, de fácil acesso e representativo da área. Instalar pelo menos uma bateria (de preferência duas) em cada área que diferir nas características do solo, tipo de cultura, declividade ou outro tipo de variação das condições locais. Para plantas com sistema radicular de até 40 cm, utiliza-se apenas um tensiômetro na metade da profundidade das raízes. Para plantas com raízes mais profundas (0,50 a 1,30 m), recomenda-se instalar um aparelho a $\frac{1}{4}$ da profundidade efetiva das raízes e outro a $\frac{3}{4}$ deste valor. A leitura obtida no primeiro tensiômetro indica o momento da irrigação e a do mais profundo indica as condições de penetração de água.

O fabricante do tensímetro digital Water Control S/C recomenda a utilização de pelo menos 15 tensiômetros em cada área de irrigação homogênea em termos de solo, variedade, idade e manejo da água (5 pontos de amostragem em 3 profundidades) não importando o tamanho da área.

Por outro lado, Silveira e Stone (2001) recomendam a instalação de apenas três baterias de tensiômetros na área irrigada. Para o sistema pivô central recomenda-se que as baterias sejam instaladas a 4/10, 7/10 e 9/10 do raio do pivô central, em linha reta a partir da base (torre), escolhendo pontos representativos da área. Já Saad (1991) recomenda uma bateria de

tensiômetros instalada dentro do último quarto do raio do pivô, no ponto onde a lâmina da água coletada seja igual à lâmina média, o que parece mais adequado.

2.2.3 Curva característica de retenção de água no solo

A idéia de quantificar a capacidade de retenção de água no solo é do início do século XX (ALWAY; MCDOLE, 1917 apud REICHARDT, 1988). As principais contribuições neste sentido são as de Veihmeyer e Hendrickson que a partir de estudos feitos em 1931 e 1949 introduziram definitivamente os conceitos de capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

A curva característica é uma maneira de representar e quantificar o conteúdo de água que pode ser retido em um solo submetido a um determinado potencial mátrico. Curva característica é o nome que se dá ao resultado gráfico da variação do conteúdo de água do solo em função do potencial mátrico. A palavra curva vem do formato da linha representativa da variação da umidade em relação à tensão que é curva, já a palavra característica advém do fato de ser este um comportamento característico de cada solo.

No passado, quando do início da tensiometria, os gráficos montados com dados de umidade versus potencial mátrico eram utilizados como ábacos. Os trabalhos de Richards (1928) e Heck (1934) mostram estes ábacos. Porém, atualmente, com o desenvolvimento da matemática computacional a curva característica é mais comumente associada a uma equação e para isso o modelo mais utilizado é aquele proposto por van Genuchten (1980) que permite o ajuste de uma equação para a faixa de tensão que vai de 0 a 1500 kPa.

Uma grande vantagem da curva característica de um solo é que, uma vez conhecida, pode-se a partir da mesma, estimar a umidade (θ) conhecendo o potencial mátrico (Ψ) ou vice versa. Esta peculiaridade permite utilizar o tensiômetro para o manejo da irrigação, pois, ele é um instrumento para medida do potencial mátrico e uma vez conhecido este potencial, pode-se através da curva característica, conhecer a umidade do solo.

No intervalo de 0 a 1500 kPa está contida toda a água de interesse para a agricultura, em especial para o manejo da irrigação. Neste intervalo destacam-se cinco pontos de umidade importantes:

- a) Umidade de saturação (θ_s) – valor associado à tensão de 0 kPa que representa o volume máximo de água possível de ser armazenado no solo. Neste ponto considera-se que todos os poros estão preenchidos com água não havendo espaço para o ar no solo.
- b) Umidade atual (θ_a) – representa a condição de umidade do solo no momento da medição. Este valor é utilizado para verificar a variação do conteúdo de água do solo e quando θ_a foi igual a θ_{cr} a irrigação deve ser iniciada.
- c) Umidade crítica (θ_{cr}) – representa o esgotamento máximo da água no solo para que não haja danos à cultura. É com base neste valor que se define o momento da irrigação e a quantidade de água a ser aplicada.
- d) Umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) – segundo Bernardo (1995), o termo “capacidade de campo” descreve a condição de movimento da água livre no solo sob a ação da gravidade, com sentido vertical para baixo e intensidade muito lenta ou nula, o que equivale a dizer, segundo Carvalho; Sampaio e Silva (1996), que não há variação da umidade (θ) com o tempo (T), ou seja, $\partial\theta/\partial T = 0$. Na literatura é comum se encontrar recomendações de valores de tensão para a estimativa da capacidade de campo como, por exemplo, Bernardo (1995) que cita a tensão de 10 kPa equivalente à capacidade de campo (C_c) para solos de textura grossa (arenosa) e de 33 kPa para solos de textura fina (argilosa). Neste sentido Reichardt (1988) esclarece que cada escolha leva a um valor diferente de capacidade de campo, não havendo nada de errado nisso desde que se compreenda que se trata de um processo dinâmico. Assim, a procura de um valor de tensão que corresponde à capacidade de campo não tem respaldo teórico. Entretanto, é aceito que os poros do solo são divididos em macroporos, mesoporos e microporos e que são os microporos os responsáveis pela retenção (armazenamento) da água no solo. É aceito também que a tensão de 60 cm.c.a. (aproximadamente 6 kPa) separa os mesoporos dos microporos, sendo a umidade volumétrica de um solo a esta tensão associado ao volume de microporos. Portanto, a tensão de 6 kPa pode ser um bom indicativo da condição de capacidade de campo de qualquer solo.
- e) Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) – está associada à tensão de 1500 kPa e representa o teor de água do solo abaixo do qual a planta sofre uma murcha, não recuperando a turgescência das folhas, quando colocada em ambiente de atmosfera saturada de umidade. Este é o conceito atribuído à umidade de murchamento, por Veihmeyer e Hendrickson (1949). Ao contrário da capacidade de campo, estes autores consideram a umidade de murchamento como

uma constante, afirmando ser ela uma característica do solo e independente da condição de desenvolvimento da planta.

Neste sentido, Arruda; Zullo e Oliveira (1987) sugerem equações para a estimativa da umidade na capacidade de campo e do ponto de murcha permanente a partir dos teores de silte e argila. O método é prático, pois, a análise granulométrica do solo é relativamente simples e barata, sendo feita em qualquer laboratório de análise física do solo, ao passo que a determinação através do extrator de Richards ou Haines é ainda pouco disponível, estando presente, principalmente, em universidades e centros de pesquisa.

2.2.4 Tensiometria no manejo da irrigação

Os critérios de manejo de água normalmente utilizados são, na maioria dos casos, baseados em medidas no solo, na planta e na atmosfera. Os baseados em medidas no solo se fundamentam na determinação direta ou indireta do teor de água presente no substrato, enquanto os baseados em medidas na planta se estabelecem no monitoramento do potencial hídrico, na resistência estomática, na temperatura da folha por meio de termômetro infravermelho e outros; já os baseados em medidas climáticas variam desde simples medidas de evaporação de água em tanque, como o Classe “A”, até complexas equações para estimativa da evapotranspiração. A grande limitação dessas equações encontra-se na precisão das estimativas, que dependem diretamente da acurácia das variáveis e da precisão desses modelos, os quais vêm sendo utilizados em condições climáticas e agronômicas muito diversas daquelas em que foram concebidas (ROCHA; GUERRA; AZEVEDO, 2003).

Existem pesquisadores que criticam a utilização da tensiometria para manejo da irrigação. Por exemplo, Marouelli e Silva (2005) citam que o uso da tensiometria para fins de manejo de água envolve custos com a aquisição de sensores de umidade e uso de mão-de-obra para a leitura dos mesmos, além da adoção de frequência de rega variável, o que desagrade à maioria dos agricultores. Para o usuário, é altamente desejável adotar turnos de rega fixos, visto que as práticas culturais e outras atividades, realizadas na propriedade, podem ser previamente planejadas.

Segundo Guerra e Silva (1998 apud Rocha 2003), atualmente os produtores irrigantes da região do Cerrado contam com apenas uma tecnologia, já estabelecida, para o manejo das

irrigações, sendo ela a medição da tensão da água no solo por meio de tensiômetros. Essa metodologia, segundo Rocha; Guerra e Azevedo (2003), apesar de ter demonstrado alto potencial de uso, não tem sido amplamente adotada pelos produtores, por necessitar de um número expressivo de instrumentos para representar cada área irrigada. Este problema é agravado pela necessidade constante de cuidados com os tensiômetros o que muitas vezes os produtores não têm condição de satisfazer. Por essas razões a utilização de modelos de estimativa de evapotranspiração tem-se mostrado bastante aplicável à realidade dos cerrados. Entretanto, o uso desses modelos sem uma prévia avaliação pode resultar na obtenção de estimativas imprecisas, o que poderia desacreditar a tecnologia junto aos produtores.

Entretanto, na literatura especializada encontram-se recomendações de uso de tensiômetros para o manejo da irrigação. Miranda; Gonçalves e Carvalho (2001) citam o tensiômetro como instrumento para a determinação da umidade do solo e comentam que este aparelho associado à curva de retenção é fundamental no manejo de irrigação. Também Bernardo; Soares e Mantovani (2006) citam o tensiômetro como instrumento para a medida da umidade do solo e relatam que este tem uma precisão relativamente boa e que pode ser utilizado para automação da irrigação.

Sousa et al. (2003) trabalhando com maracujazeiro amarelo na região de Piracicaba usou tensiômetros para definir o momento da irrigação com base nas tensões entre 8,5 e 10 kPa. O volume de água aplicado foi determinado por lisimetria.

Também Figueredo et al. (1998), adotaram tensiômetros para o manejo da irrigação, instalados nas profundidades de 0,10, 0,20, 0,30 e 0,40 m. O momento da irrigação foi determinado pelo tensiômetro localizado a 0,10 m e a lâmina a ser aplicada foi calculada com base na indicação de tensão de todos os tensiômetros até a profundidade de 0,40 m. Saad e Libardi (1992^a) nomearam este tensiômetro mais superficial de tensiômetro de decisão, pois é com base nele que os autores recomendam a determinação do momento da aplicação de água.

Pavani et al. (2003) avaliaram dois tipos de manejo da irrigação (tensiometria e balanço hídrico simplificado) na cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, em plantio direto e convencional. Os autores verificaram que ambos os métodos são possíveis de serem adotados por irrigantes ou técnicos com nível médio de tecnologia e conhecimento, embora o de tensiometria ofereça, se adequadamente conduzida, um melhor entendimento das reais condições hídricas do solo na região do sistema radicular da cultura. O manejo por tensiometria causou maiores

variações na água disponível consumida do que o tanque Classe A e resultou em relação a este, uma economia de 15 % na água de irrigação aplicada, sem afetar a produtividade de grãos.

A variabilidade no arranjo poroso de solos leva a diferentes condições de retenção de água e, conseqüentemente à variações da tensão (PACHECO et al., 1994). Há na literatura alguns trabalhos onde os autores comentam sobre essa característica.

Villagra et al. (1988), trabalhando com tensiômetros instalados na zona arável do solo sob pivô central, apresentaram resultados detalhados sobre esta variabilidade e concluem que ela é fator importante, não podendo ser desprezada tanto em experimentação científica como em seu uso para manejo dos solos.

Da mesma forma Pacheco et al. (1994), estudando a variabilidade espacial e temporal do potencial mátrico da água em terra roxa estruturada na região de Piracicaba, com o uso de tensiômetros, concluíram que a medida do potencial matricial, neste tipo de solo, feita com tensiômetros, em camadas profundas do solo, tem coeficientes de variação da ordem de 5 % a 12 %, sendo tanto menor quanto mais seco o solo.

Silva et al. (2003) compararam o manejo da irrigação feito com lisímetro poroso e tensiometria na produção do melão rendilhado. Os autores verificaram ao final do experimento que o lisímetro pososo com carga hidráulica de 0,3 m.c.a. promoveu uma condição de elevada umidade do solo, afetando a produção. Já o manejo com tensiômetro (30 kPa) proporcionou boa produção de melão rendilhado.

2.2.5 O tensiômetro na automação da irrigação

O monitoramento contínuo da água no solo tem se tornado cada vez mais atrativo em problemas envolvendo o manejo e conservação do solo e da água (TEIXEIRA et al., 2003). Portanto, instrumentos dedicados ao monitoramento automático têm sido amplamente adotados para esse fim.

Medici (1997) idealizou um equipamento denominado “acionador automático de sistemas de irrigação”, o qual é constituído de um tensiômetro de coluna de mercúrio contendo contatos elétricos posicionados na região de trânsito do mercúrio. O autor recomenda a utilização deste sistema para controle da irrigação de jardins e casa de vegetação. Este parece ser o primeiro trabalho de automação da irrigação, com o uso de tensiômetro, feito no Brasil. A patente do

protótipo foi requerida pelo autor em 1997. O sistema proposto foi avaliado por Carvalho et al. (2001). Os autores concluíram que o sistema mostrou-se eficiente necessitando de pouca manutenção a fim de garantir o contato elétrico e o acionamento automático.

O sistema de automação da irrigação proposto por Medici (1997) representa uma enorme contribuição, principalmente quando se pensa no baixo custo. Entretanto, deixa a desejar na representatividade, pois utiliza apenas um sensor (tensiômetro) para o acionamento da irrigação; além de não permitir o correto controle do volume de água aplicado.

Queiroz et al. (2002) observando a dificuldade de manejo da irrigação em experimentos conduzidos em vasos na Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras – MG, idealizaram e construíram um controlador de irrigação baseado no princípio de Medici (1997), mas que implementava um controle digital fundamentado na álgebra Booleana para melhor representatividade das leituras dos tensiômetros. O circuito foi projetado para operar ligado a três tensiômetros e iniciar a irrigação sempre que pelo menos dois destes estivessem indicando o momento da irrigação. Os autores preocupados com o controle preciso da lâmina aplicada adicionaram ao sistema temporizadores para limitar o volume aplicado conseguindo excelente desempenho. Queiroz et al. (2005) avaliaram o circuito proposto cultivando o feijoeiro comum em vasos, dentro de casa de vegetação, encontrando resultados satisfatórios.

Mesmo com algumas vantagens, tanto o sistema de Medici (1997) quanto o de Queiroz et al. (2002), apresentam o inconveniente da necessidade de fios elétricos para a comunicação dos sensores (tensiômetros) com o controlador. Este fato inviabiliza a sua utilização no campo, principalmente em sistemas maiores como, por exemplo, o pivô central. Outra desvantagem é que os sistemas não têm capacidade de leitura real da tensão, apenas respondem a um estímulo elétrico funcionando simplesmente como chaves liga/desliga automáticas.

Por muitos anos o tensiômetro tem sido usado para monitorar o estado de umidade do solo. Leituras são normalmente feitas uma ou duas vezes por dia (NYHAN; DRENNON, 1990). A solução deste problema foi encontrada tendo resultado no uso de transdutores de pressão acoplados aos tensiômetros (LOWERY; DATIRI; ANDRASKI, 1986), o que segundo Teixeira e Coelho (2005) tem se tornado uma tendência atual para aquisição automática de dados.

Portanto a associação da idéia de Medici (1997), Queiroz et al. (2002) e Lowery; Datiri e Andraski (1986) com um sistema de comunicação sem fio pode ser uma ferramenta muito útil para o controle automático da lâmina aplicada em sistemas de irrigação do tipo pivô central.

2.3 Eletrônica na agricultura

Segundo Burt e Pião, 2002 apud Amaral; Righes (2005), comportas hidráulicas automáticas para o controle da lâmina d'água a montante e à jusante já eram utilizadas na Califórnia desde 1930. Por volta de 1940, na Holanda, foram projetadas as primeiras comportas basculantes automáticas para controle de lâmina d'água a montante. Durante a década de 50 do século passado, surgiram as comportas hidromecânicas AMIL para controle de lâmina a montante, e as comportas AVIO e AVIS para o controle da lâmina à jusante, fabricadas pela companhia francesa Neyrtec. Entre 1960 e 1970, outra tendência em automação de canais começou a surgir nos Estados Unidos, onde foram desenvolvidos controladores eletrônicos e modelos matemáticos para simular o escoamento em canais.

A rápida evolução da eletrônica, associada à expansão crescente do mercado, tem possibilitado o acesso à tecnologia e ferramentas de ponta que antes eram disponíveis em laboratórios bem equipados e centros de pesquisa (GOMIDE, 1998). A engenharia agrícola, de um modo geral, tem se beneficiado desse avanço tecnológico, seja no desenvolvimento de novos equipamentos, seja na adaptação dos já disponíveis em outros setores da produção, para uso na agricultura (VILELA et al., 2003).

Atualmente, muitos pesquisadores utilizam computadores pessoais (PC) com placas de expansão para aquisição de dados em pesquisa laboratoriais, controle industrial, e em testes e medições. Na agricultura, vários cientistas têm trabalhado em diferentes áreas, utilizando algum tipo de sistema de aquisição de dados com a finalidade de monitorar eventos em suas pesquisas (GARCIA et al., 2003).

Dentre os dispositivos eletrônicos, os microcontroladores têm sido usados para as mais variadas tarefas. Rocha; Guerra e Azevedo (2003) utilizaram lisímetros instrumentados para aferição do volume de água consumida pela cultura com o objetivo de ajustar o modelo de Chistiansen-Hargreaves para a estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. Os autores utilizaram, para isso, células de cargas e display digitais de indicadores de balança.

Leib; Mattews e Kroeger (1999) desenvolveram um sistema de monitoramento da irrigação em tempo real com "micro-loggers". Os autores chamam a atenção para conservação da água, economia de energia, aumento da produtividade e da qualidade além da redução da poluição.

Bianchini et al. (2002) desenvolveram um penetrógrafo eletrônico automático. Foi utilizado um microcontrolador da Família 16F87X e sistema de comunicação com satélite para obtenção de latitudes e longitudes. O equipamento possui memória para armazenamento de até 187 ensaios e sistema de comunicação com o PC para esvaziamento da memória a qualquer momento.

Atualmente, nota-se intensa modificação do meio rural. Ela se deve ao uso intensivo de tecnologia de ponta, voltada para aumentar a capacidade de trabalho na propriedade e a precisão dos equipamentos, visando a racionalização do uso dos recursos naturais e redução do efeito nocivo ao meio ambiente. Esse avanço tem sido possível graças ao uso de automação, instrumentação e ferramentas de suporte à tomada de decisão (MANTOVANI; QUEIROZ; DIAS, 1998).

Essa nova visão de agricultura, denominada agricultura de precisão, depende de um número expressivo de informações, principalmente de características do clima e do solo de cada propriedade rural (BIANCHINI et al., 2002). Segundo esses autores, o desenvolvimento de equipamentos e transdutores que visem reduzir o tempo amostral e os custos da amostragem e da análise, tem-se apresentado muito promissor.

2.4 Sistemas de controle

A instrumentação é uma ciência que aplica e desenvolve técnicas de medição, registro e controle de processos de fabricação, visando a otimização na eficiência desses processos (OGATA, 1967 apud CONCEIÇÃO, 2002).

Existem dois modos de projetar um sistema de controle, podendo ser ele analógico ou digital. Sendo o digital, geralmente monitorado por “software”. Já o analógico pode ser monitorado por diversos tipos de comparadores e portas lógicas. O desempenho dos controladores em ambas as tecnologias (analógica e digital) é equivalente. Destaca-se a tecnologia digital pela flexibilidade de implementação via “software”, pela alta confiabilidade, pela facilidade de geração dos comandos dos interruptores auxiliares e pela implementação do sistema de monitoramento em um único DSP (Processador de Sinal Digital) (SCHUCH; RECH; PINHEIRO, 2005).

A grandeza a ser controlada, tensão ou corrente em um componente, pode ser obtida utilizando um resistor como sensor. Esta operação consiste em posicionar um resistor com baixa

resistência, em série com o componente cuja corrente será controlada, ou mesmo, um resistor com alta resistência em paralelo com o componente do qual se deseja controlar a tensão (ROEL et al., 2002).

2.4.1 Sensores

Diversos tipos de sensores estão sendo aplicados no monitoramento e controle de variáveis ambientais com especial aplicação em sistemas agrícolas modernos. Um tipo de sensor que vem sendo amplamente utilizado na agricultura é o transdutor de pressão (VILELA et al., 2003). Todo transdutor é um sensor, mas nem todo sensor é um transdutor. Segundo Bolton (1982 apud CANSADO, 2000) o termo transdutor é utilizado para descrever qualquer item que transforme informação de uma forma para outra. A razão para a mudança é obter informação que possa ser medida de uma maneira simples e fácil. Transdutores podem operar baseados em variação da dimensão, resistência elétrica, força-eletromotriz, intensidade de calor e luz, entre outros.

Segundo Zoerb (1991 apud VILELA et al., 2003) transdutores que empregam membrana de silicone têm sido amplamente utilizados para medição de pressão em virtude do menor custo, elevada precisão e por apresentarem compensação da temperatura. Sensores com as características citadas são fabricados pela Motorola CO e chegam ao Brasil por um custo que pode variar de US\$18,00 a US\$25,00, por isso são considerados de baixo custo. Estes transdutores compõem uma família designada pelo código MPX e são disponíveis para uso em diversas faixas de pressão. Podem operar tanto como manômetro, quanto como vacuômetro e ainda permitem a medição diferencial de pressão.

Devido a grande quantidade de cabos, o alto custo de instalação, a alta taxa de falhas devido a conexão e a dificuldade na localização de defeitos, torna-se necessário o desenvolvimento de alternativas para o sistema de controle. A alternativa mais promissora é o “Sensor sem fio” utilizado em radiometria. Esses sensores são integrados com componentes de condicionamento de sinais, digitalização, processamento (inteligência) e comunicação, todos eles no mesmo substrato de silício (CANSADO, 2000).

Segundo Conceição (2002) a escolha apropriada de sensores eletrônicos deve considerar 6 passos, a saber:

- a) Faixa de medida: conjunto de valores da variável medida, que estão compreendidos dentro dos limites inferior e superior da capacidade de medição ou de transmissão do instrumento. Expressa-se determinando os valores extremos;
- b) Alcance (ou amplitude): é a diferença algébrica entre os valores superior e inferior da faixa de medida do instrumento. Por exemplo, um instrumento com faixa de medida de 100 °C a 250 °C, possui um alcance de 150 °C;
- c) Erro: é a diferença entre o valor medido ou transmitido pelo instrumento, em relação ao valor real da variável medida. Quando se tem o processo em regime permanente, estável, o mesmo é chamado de “erro estático”, que será positivo ou negativo, dependendo da indicação do instrumento que poderá estar medindo a mais ou a menos. Por outro lado, quando se tem a variável se alterando, ter-se-á um atraso na transferência de energia do meio para o medidor, onde o valor medido estará geralmente atrasado em relação ao valor real da variável. Essa diferença é chamada de “erro dinâmico”;
- d) Precisão: define-se como sendo o maior valor de erro estático que um instrumento pode ter ao longo de sua faixa de trabalho. Pode ser expressa de diversas maneiras como: porcentagem do alcance, unidade da variável e porcentagem do valor medido;
- e) Sensibilidade: é a razão entre a variação do valor medido ou transmitido para um instrumento e a variação da variável que o acionou, após ter alcançado o estado de repouso. Pode ser expressa em unidades de medida de saída e de entrada. Por exemplo, um termômetro de vidro com faixa de medida de 0 °C a 500 °C possui uma escala de leitura de 50 cm, portanto, a sua sensibilidade é de 0,1 cm °C⁻¹;
- f) Histerese: é a diferença máxima apresentada por um instrumento, para um mesmo valor, em qualquer ponto da faixa de trabalho, quando a variável percorre a escala nos sentidos ascendente e descendente.

Garcia et al. (2003), trabalhando com sensores de Força, Torque, Rotação e Velocidade verificaram, após calibração prévia, que a resposta destes foi linear, com uma correlação de mais de 98 %. Teixeira e Coelho (2005) utilizando um transdutor de pressão para automação de tensiômetros também obtiveram resposta linear deste transdutor.

2.4.2 Controladores de irrigação

No mercado brasileiro existem várias marcas e modelos de controladores de irrigação, sendo a grande maioria sistemas dedicados. Figueredo Júnior; Silva e Alves Junior (2004) reuniram em seu artigo alguns sistemas de automação da irrigação localizada (Sistema IRRINET, Sistema GAL, Sistema MIRACLE e Sistema RAIN BIRD). Todos os sistemas comentados pelos autores são compostos de tecnologias importadas.

Existem à disposição do agricultor brasileiro, sistemas automáticos de irrigação que operam em malha fechada monitorando sensores de solo e clima. Os sistemas mais evoluídos contam até com controle remoto (“Wireless”) fazendo a chamada automação sem fio. Todavia, os controladores predominantes são aqueles dedicados que executam apenas um programa de gerenciamento de portas que permitem abrir e fechar válvulas em datas e intervalos de tempo pré-programados.

A pesquisa brasileira tem apontado muitas soluções simples e de baixo custo para a automação tanto do monitoramento das variáveis ambientais através de sensores, quanto da aplicação de água.

2.5 Microcontroladores e Microprocessadores

O microcontrolador é definido como sendo um sistema computacional integrado, pois possui unidade de processamento, memória e entradas e saídas integradas em um único chip. É assim denominado, pois, a partir de dados de entrada, executa algum processamento, mediante um programa armazenado em uma memória, gerando uma saída. Já um microprocessador é um circuito integrado que possui uma poderosa Unidade Central de Processamento (CPU). É o microprocessador quem processa as informações de uma memória ou de um periférico. Não é possível obter um computador somente com um microprocessador. Estes são requisitados sempre que houver a necessidade de se processar inúmeros cálculos em um curtíssimo intervalo de tempo (NUMAJIRI, 2003).

Por outro lado, Angnes (2003) classifica os microcontroladores e os microprocessadores como sendo computadores digitais que realizam operações em sequência sem intervenção

humana. As operações são programadas por um programador, que segue uma lista de instruções que compõe a linguagem de programação (Assembly, C, Java, Basic, etc).

Os microcontroladores (μC 's) são conhecidos como computadores embutidos em circuito integrado. Em um μC podemos encontrar memória, CPU, entradas e saídas de dados. Alguns ainda possuem periféricos como conversores Analógico/Digital (A/D) e Digital/Analógico (D/A), comparadores, e outros. Os μC 's chegam a custar, muitas vezes, menos do que um transistor (REBELLO JUNIOR, 2004). Existe enorme quantidade de microcontroladores e microprocessadores no mercado. Na Tabela 1 são mostrados alguns exemplos.

Tabela 1- Exemplos de Alguns microcontroladores e microprocessadores encontrados no mercado

Microcontrolador	Fabricante
Família 8051	Intel
PIC	Microchip
AVR	Atmel
Basic Stamp	Parallax
Basic Step	Tato Equipamentos
Microprocessador	Fabricante
Z80	Zilog
4004, 8080, X86, Pentium, Celeron, Itanium	Intel
D5, K6, Athlon, Duron	AMD
G3, G4	MAC

Fonte: Rueda (2005)

Os μC 's estão presentes em agendas eletrônicas, telefones celulares, máquinas fotográficas digitais, alarmes, controladores lógico programáveis (CLP), veículos, caixas eletrônicas, impressoras, e em muitos outros produtos de uso cotidiano, inclusive na agricultura.

2.5.1 Basic Step

O Basic Step é um microcontrolador que apresenta facilidades na sua utilização, em relação aos outros, uma vez que possui comandos em português e inglês. Alimentação de 7,5 a 15 Vcc (volt em corrente contínua). Possui 8 portas configuráveis para entrada ou saída com capacidade de corrente de 25 mA, conversor A/D de 5 canais com resolução de 10 bits, além de tamanho

reduzido (ANGNES, 2003). Vilela et al. (2003) destaca também, como vantagem, o baixo custo deste componente.

Além disso, o Basic Step é programado pela linguagem TBASIC (Inglês) ou PBASIC (Português). Possui apenas 32 instruções, dentre elas uma única estrutura de “loop”, o “for next”, uma condicional, o “if then” e memória de 256 bytes para armazenar o programa. O seu compilador permite a edição de texto do código fonte, possui “debug” para procurar erros de digitação, “download” para transferência do programa do microcomputador para o microprocessador e ajuda para consulta de instruções.

O Basic Step engloba em uma única placa, um microcontrolador PIC16F628, uma memória com o interpretador PBASIC e um regulador de tensão. Pode ser programado diretamente pela porta serial do computador, via cabo, por isso, não precisa de programas caros ou difíceis de construir. Seus 14 pinos, em linha, encaixam perfeitamente na matriz de contatos, simplificando testes (REBELLO JUNIOR, 2004).

Segundo Einsfeldt e Wisintainer (2002) um dos grandes fatores para a escolha da linguagem PIC Basic são as facilidades trazidas por seus comandos e funções a citar o “serin” e o “serout”. Estas vantagens fazem do microcontrolador PIC uma peça extremamente poderosa no desenvolvimento de um sistema de controle automático.

O programa, após ser enviado pelo computador, permanece armazenado na memória “EEPROM” do microcontrolador, sendo executado toda vez que o equipamento for ligado (VILELA et al., 2003).

O compilador está na versão 1.2.0.3 e pode ser executado no Windows 95 ou superior e no Windows XP. Não existe uma versão do mesmo para o sistema operacional LINUX. O Hardware mínimo, necessário para um bom desempenho em termos de tempo, é um microcomputador 100 MHz com 8 MB de memória e 2 MB de espaço no disco com um driver de disquete (REBELLO JUNIOR, 2004).

Recentemente, em meados de 2005, o fabricante do Basic Step 1 lançou outras duas versões: o Basic Step Light, com metade da memória (128 “bytes”) e sem A/D e o Basic Step OEM com os mesmos recursos do Basic Step 1. A diferença básica é que tanto o Light quanto o OEM são implementados em um circuito integrado fora da placa e não contém regulador de tensão, sendo preciso alimentá-los com 5 Vcc. Outra diferença importante é o preço (Basic Step 1 = R\$59,00; Basic Step OEM = R\$29,00; Basic Step Light = R\$19,00).

Atualmente, muitos trabalhos envolvendo conceitos de automação e controle têm sido desenvolvidos a partir do Basic Step. Vilela (2002) desenvolveu um sistema de aplicação de defensivos acoplado a um pivô central, no qual um microcontrolador Basic Step foi utilizado para controle de toda a rotina de tarefas eletro-eletrônicas realizadas.

Vilela et al. (2003) desenvolveram e construíram um manômetro digital microprocessado utilizando o Basic Step. Os autores compararam o manômetro construído com um manômetro padrão de “peso morto” e verificaram um erro médio, para toda a faixa de pressão avaliada, de 3,1 %. Quando compararam o custo dos materiais utilizados na fabricação do modelo desenvolvido com o custo de um equipamento similar disponível no mercado verificaram redução de 64 %.

Garzella (2004) desenvolveu um dispositivo de leitura automática para o medidor de umidade do solo conhecido como “Speed”. Foi utilizado um microcontrolador Basic Step 1, um conversor Analógico/Digital (A/D) de 8 “bits”, “display” de cristal líquido e sistema de comunicação serial com o computador, onde os dados medidos puderam ser armazenados em arquivo de texto.

Ibars (2004) desenvolveu e avaliou tubos venturi para medição da vazão, onde foi utilizado um microcontrolador Basic Step 1 para a automação da aquisição de dados do aparelho desenvolvido. Os resultados obtidos mostraram que o sistema desenvolvido apresentou boa precisão e exatidão.

Rebello Junior (2004) desenvolveu um sistema de aquisição de dados agrometeorológicos baseado no microcontrolador Basic Step. O autor utilizou o modelo Basic Step 1 e um conversor analógico digital de 8 “bits” para realizar leituras de sinais oriundos de sensores de temperatura, radiação solar e velocidade do vento. À semelhança do trabalho de Garzella (2004) o microcontrolador foi ligado a um microcomputador para o armazenamento dos dados lidos.

Também Rueda (2005), utilizou o microcontrolador Basic Step para desempenhar o controle automático do nível de poeira. O sistema proposto foi avaliado em laboratório utilizando pó de giz para simular a produção de poeira em uma estrada de mineradora. Todo o processo de monitoramento do nível de poeira e controle do sistema de irrigação utilizado para eliminação da mesma foi comandado pelo Basic Step. Segundo o autor o microcontrolador utilizado conseguiu atender todas as necessidades inerentes ao protótipo desenvolvido.

2.6 Aquisição de dados e controle

De uma forma simples, aquisição de dados é, a coleção de informações que descreve uma situação dada; e controle implica na geração de um sinal de saída em resposta a um dado de entrada, podendo ser de malha aberta ou fechada (REBELLO JUNIOR, 2004).

A aquisição de dados é uma atividade essencial em todo tipo de tecnologia e ciência. O objetivo de um sistema desse tipo é apresentar, ao observador, os valores das variáveis, ou parâmetros, que estão sendo medidos. Geralmente, o valor medido não é igual ao valor real da variável, ou seja, o sistema de aquisição tem como entrada o valor real da variável e sua saída é o valor medido (GARCIA et al., 2003).

Acionar o sistema de irrigação todos os dias às 16:00 horas, é um exemplo de controle em malha aberta. Acionar o sistema de irrigação porque sensores identificaram a diminuição da água disponível no solo até um ponto crítico, é um exemplo de controle em malha fechada. O que se tem visto atualmente, na prática, é uma enormidade de controladores de irrigação que operam em malha aberta. A pesquisa agropecuária brasileira tem apontado na direção oposta, sugerindo e desenvolvendo sistemas de controle da irrigação em malha fechada (MEDICI, 1997; GERVÁSIO et al. 2001; QUEIROZ, 2002; GERVÁSIO et al. 2003, VILELA et al., 2003; QUEIROZ 2004; QUEIROZ et al., 2005 e outros).

Em qualquer sistema de aquisição de dados, a informação de um ou mais sensores é transmitida a uma placa de entrada analógica, onde é condicionada e convertida para um sinal elétrico. Este sinal, já na forma digital, é então enviado ao computador para processamento.

2.6.1 O uso do microcomputador

Nos equipamentos que se deseja monitorar, ou controlar, são instalados sensores que transformam um fenômeno físico em sinais elétricos. Os sinais elétricos produzidos variam de acordo com os parâmetros físicos que estão sendo monitorados, e devem ser condicionados para fornecer sinais apropriados à placa de aquisição de dados. Os acessórios de condicionamento de sinais amplificam, isolam, filtram e excitam sinais para que estes sejam apropriados às placas de aquisição. Uma vez condicionados e trabalhados na forma desejada, os sinais podem ser lidos em

computadores, com placas específicas instaladas, e armazenados em diferentes formas, como arquivos de texto, por exemplo, (GARCIA et al., 2003).

Segundo D'Azzo e Houpis (1975 apud Conceição, 2002) a função do computador não está somente em projetar sistemas de controle, mas também executar as funções de controlador. Os recentes progressos em computadores digitais e em microprocessadores tornaram sua utilização bastante atraente como componentes integrantes de sistemas de controle. As vantagens de custo e dimensões, associadas aos microcomputadores, tornaram seu uso como controladores, física e economicamente viável.

No passado, quando a tarefa principal era o monitoramento de processo, uma forma aceita de automação era um “datalogger” automático. Quando o monitoramento não era a única tarefa, controladores programáveis eram, em geral, utilizados para contornar as necessidades do problema. Entretanto, com o crescente número de aplicações, “dataloggers”, controladores programáveis e microcontroladores podem não fazer tudo o que se deseja, devido em parte, pelas limitadas funções fornecidas pelo seu “hardware” e “software”. Sistemas modernos, que oferecem esta grande gama de capacidade, estão baseados em microcomputadores (REBELLO JUNIOR, 2004).

Computadores modernos oferecem alta velocidade, flexibilidade, adaptabilidade, consistência, confiabilidade e memória de massa. Estas características fornecem capacidade de matemática avançada, análise, memória, “display” (monitor), geração de relatórios, capacidades de controle e comunicação. Entretanto, muitos sinais do mundo real (temperatura, umidade, pressão, fluxo, velocidade, posição, etc) não podem ser lidos diretamente pelos microcomputadores. Estes parâmetros são representados por sinais analógicos distinguidos por seus níveis contínuos. Como o computador (Máquina digital) só pode reconhecer sinais digitais, há necessidade de um artifício de conversão para realizar esta tradução. O elo de ligação entre os sinais do mundo real para o formato do microcomputador deverá ser fornecido pelos produtores de aquisição de dados e controle, tornando-se a ponte entre os dois mundos. Esta ponte é implementada basicamente pela utilização de conversores A/D e D/A.

Com o advento do computador pessoal, tornou-se possível para qualquer usuário obter as vantagens de flexibilidade, potência e eficiência na aquisição de dados e controle. Estes sistemas oferecem baixo custo e alta performance através de técnicas de utilização simples. Graças a um significativo grau de padronização entre fabricantes de computadores pessoais e de sistemas de

aquisição de dados e controle, uma grande família de ferramentas de “hardware/software” e pacotes de aplicação tem sido desenvolvido. O resultado é que um especialista implementa um sistema de aquisição e controle, usando somente uma fração do tempo e dinheiro anteriormente necessários. Além do mais, microcomputadores são um convite para inovações, como a que revolucionou escritórios e indústrias e agora estão revolucionando a agricultura.

Segundo Rebello Junior (2004), as primeiras aplicações de “interface” de computadores com os sensores de campo exigiam um profundo conhecimento do “hardware” e um tedioso trabalho de programação de baixo nível, utilizando linguagem “assembly”. Mas esta situação está mudando drasticamente. Vários fabricantes têm oferecido produtos de fácil interface com o computador.

Cita-se como exemplo o trabalho de Steidle Neto e Zolnier (2006), que calibraram e validaram um sensor de temperatura para medidas em ambientes agrícolas, utilizando para isso a porta paralela de um microcomputador, sendo o Basic Step um exemplo.

2.6.2 “Interfaces” de comunicação

Existem várias maneiras de ligar um dispositivo externo à um computador, como, conexão via cabo paralelo, rádio frequência, “interface” infravermelho (IrDA), porta USB (Universal Serial Bus) e conexão via cabo serial.

No computador existem duas “interfaces” de comunicação clássicas: a “interface” paralela e a “interface” serial. Há alguns anos atrás, toda impressora era conectada à “interface” paralela e todo mouse era um dispositivo serial. Hoje, muitas impressoras usam a “interface” USB e nos PCs mais novos, a porta padrão para o mouse é a PS/2. Contudo, as “interfaces” paralela e serial ainda existem em quase todos os computadores e podem ser muito úteis (NUMAJIRI, 2003).

2.6.2.1 “Interface” serial

O termo oficial promulgado pela IBM para a porta serial é, porta de comunicações de dados assíncrona. Embora, normalmente, seja abreviado para porta assíncrona ou porta de comunicação. Além disso, como a grande maioria das ligações seriais aceita pela indústria de computadores opera sob um padrão chamado RS-232 (um nome dado por uma associação industrial, a

Electronics Industry Association, ou EIA), a porta serial comum, normalmente, é descrita por sua especificação como porta RS-232 (NUMAJIRI, 2003).

Segundo o mesmo autor, devido a simplicidade do “hardware”, a “interface” serial é muito utilizada dentro da indústria eletro-eletrônica. Hoje, o padrão de comunicação serial mais utilizado é o EIA/TIA – 232 ou, simplesmente, RS-232. Com esse padrão, pode-se estabelecer uma comunicação bidirecional entre dois dispositivos usando apenas três fios. Daí vem a sua simplicidade e praticidade.

A comunicação RS-232 é muito utilizada em microcontroladores. A maioria deles tem um periférico exclusivo para comunicação RS-232. Por isso, a “interface” serial é uma maneira simples e prática de fazer o computador comunicar-se com o meio externo.

Na Tabela 2 são mostrados os tipos de conectores utilizados para acesso à porta serial do computador.

Tabela 2 - Detalhes dos pinos da porta serial RS-232 ligado aos conectores DB9 e DB25

DB9 Macho		Sinal	DB25 Macho	
Esquema	Pinos		Pinos	Esquema
1	CD – Detecção da portadora	8
	2	RXC – Recepção de dados	3	
	3	TXD – Transmissão de dados	2	
	4	DTR – Terminal de dados pronto	20	
	5	GND – Terra	7	
	6	DSR – Dado pronto	6	
	7	RTS – Permissão para envio	4	
	8	CTS – Permissão fornecida	5	
	9	RI – Indicador de chamadas	22	

Fonte: Rueda (2005)

2.6.2.2 “Interface” paralela

A porta paralela é uma “interface” de comunicação entre o computador e um periférico. Quando a IBM criou o seu primeiro computador pessoal, a idéia era conectar a essa porta uma impressora, mas atualmente, são vários os periféricos que se utilizam da mesma para enviar e receber dados para o computador. Como exemplo pode se citar: “scanners”, câmeras de vídeo, unidade de disco removível e diversos outros tipos de placas de comunicação (MESSIAS, 2005).

Conhecendo um pouco de eletrônica e dominando uma linguagem de programação como: C, C++, Pascal, Delphi ou mesmo o Visual Basic, pode se desenvolver um programa que controle um aparelho conectado à porta paralela, ou um programa de transferência de arquivos entre dois computadores, utilizando um cabo de gravação como meio de transmissão.

A porta paralela SPP (Standard Parallel Port) pode chegar a uma taxa de transmissão de dados de 150 kHz, comunicando com a CPU utilizando um “BUS” de dados de 8 “bits”. A porta avançada EPP (Enhanced Parallel Port) chega a atingir uma taxa de transferência de 2 MB/s. Para atingir essa velocidade, será necessário um cabo de comunicação especial. Esta se comunica com a CPU utilizando um “BUS” de dados de 32 “bits”. Para a transmissão de dados entre periféricos são usados 8 “bits” por vez. Há ainda outro tipo de porta conhecida como porta avançada (ECP - Enhanced Capabilities Port). Ela tem as mesmas características da EPP, porém, utiliza DMA (Acesso Direto à Memória), sem a necessidade de uso do processador para a transferência de dados. Utiliza também um “buffer” FIFO de 16 “bytes”.

A extensão do cabo para interligar um computador a um periférico, é de no máximo 8 m. Na prática, utiliza-se um cabo com extensão menor. Quanto maior a extensão do cabo, maior é a interferência na transmissão dos dados. Os cabos de comunicação paralela podem ser comprados prontos (cabos de impressora) ou podem ser construídos pelo próprio usuário no tamanho desejado, bastando para isso conhecer a pinagem dos conectores DB-25.

O conector DB-25 é um conector que fica na parte de trás do gabinete do computador, e é através deste, que o cabo paralelo se conecta ao computador para poder enviar e receber dados. A porta paralela adota padrão Transistor Transistor Logic (TTL) nos seus pinos, ou seja, um pino estará em nível lógico baixo (0) quando a tensão elétrica no mesmo estiver entre 0 e 0,4 V e estará em nível lógico alto (1) quando a tensão elétrica no mesmo estiver entre 3,1 e 5 V.

Na Tabela 3 é mostrado o detalhe do conector DB-25 que fica atrás do PC. Cada pino é identificado pelo seu nome e número.

Tabela 3 – Detalhe da porta paralela do computador mostrando os pinos do conector DB-25 e seus respectivos significados

Conector DB-25			
Esquema	Pinos	Sinal	Estado
2	D0	“Data Register”
	3	D1	
	4	D2	
	5	D3	
	6	D4	
	7	D5	
	8	D6	
	9	D7	
	15	S3	“Status Register”
	13	S4	
	12	S5	
	10	S6	
	11	/S7	
	1	/C0	“Control Register”
	14	/C1	
	16	C2	
	17	/C3	
	18-25	GND	“Ground”

Fonte: Rueda (2005)

A porta paralela é um dispositivo de acesso externo disponibilizando 8 “bits” de saída, 5 de entrada e outros 4 que podem operar como entrada ou saída. Ela é constituída de 3 registradores endereçados sequencialmente. Geralmente em hexadecimal, o endereço base (registro de dados) é o 378h (saída de 8 “bits”), mas existem casos onde este endereço base é o 278h. O endereço de registro de estado é o 379h (entrada de 5 “bits”) ou 279h e o endereço de registro de controle é o 37Ah (bidirecional de 4 “bits”) ou 27Ah (VILELA, 1999).

Ainda segundo Vilela (1999), deve-se dar atenção para a capacidade de fornecer/drenar (“source/sink”) corrente, pois esta varia dependendo do tipo de lógica adotada na implementação do circuito da porta. A maioria das portas paralelas são atualmente implementadas em ASICs, podendo fornecer/drenar cerca de 12 mA. Entretanto, existem “datasheets” (folha de dados) que citam capacidades de “Source/Sink” de 6 mA, “Sink” de 20 mA e “Source” de 12 mA, “Sink” de 16 mA e “Source” 4 mA, etc. Dessa forma, por precaução, deve-se fazer experiências utilizando circuitos com “Source/Sink” de no máximo 4 mA, testando na pior situação possível.

2.6.2.3 “Interface wireless”

A tecnologia “wireless” (sem fio) pode substituir o cabo serial de comunicação entre duas máquinas digitais, através da implementação de um par transmissor/receptor de radiofrequência. Embora a instalação deste sistema possa ser um pouco mais cara, dependendo da situação, pode-se economizar tempo e dinheiro, já que se elimina a necessidade de instalação de cabos. O sistema “wireless” pode expandir a rede de dados ou aumentar o número de dispositivos em locais onde for difícil a passagem de cabos.

Redes de sensores sem fio (RSSF) constituem um campo de pesquisa emergente com amplas implicações ao conectar os mundos digital e físico. A estreita conexão com o ambiente físico permite que os sensores forneçam medições locais detalhadas, as quais são difíceis de se obter através de técnicas de instrumentação tradicionais ou de sensoriamento remoto. Se por um lado as redes de sensores trazem novas e amplas perspectivas para o monitoramento de variáveis ambientais, por outro lado, trazem novos desafios (DELICATO et al., 2004).

Uma RSSF é composta por dezenas a milhares de dispositivos de baixo custo e tamanho reduzido capazes de realizar sensoriamento, processamento e transmissão de informação através de enlaces sem fio. Sensores são alimentados por baterias não recarregáveis e devem operar sem assistência humana por longos períodos de tempo (DELICATO et al., 2004).

Segundo Cansado (2000), brevemente será introduzido no ambiente de estufas agrícolas sensores e atuadores inteligentes, comunicando sem fio, algoritmos de controle otimizados e integração com a internet, que proporcionará o controle, monitoramento e gerenciamento remoto, de qualquer lugar do mundo.

A comunicação de dados via radiofrequência mostra-se como uma ferramenta cada vez mais atraente. Ela é vista dessa forma por se mostrar poderosa, por oferecer frequências de trabalho de curta, média e longa distância, bem como flexível, por fazer uso do ambiente como meio de comunicação (atmosfera como portadora), a liberdade de comunicação com regiões isoladas ou que não dão condições de uma ligação física entre o transmissor e o receptor (EINSFELDT; WISINTAINER, 2002).

A tecnologia de radiofrequência passou a ser utilizada recentemente como meio de transmissão entre computadores. O uso deste recurso é possível desde que o sinal digital seja convertido para sinal de rádio. No entanto, para que ocorra a transmissão de forma satisfatória, o

sinal deve ser transmitido com potência suficiente para ser recuperado pelo receptor, apresentando o mínimo de distorção (TRAFNER, 1996 apud EINSFELDT; WISINTAINER, 2002). Einsfeldt e Wisintainer (2002) ressaltam ainda que esta tecnologia requer cuidados na sua utilização, em função de estar susceptível a distorções, ruídos e interferências.

Esses mesmos autores desenvolveram um sistema de automação da coleta de níveis fluviais. Utilizaram para isso um microcontrolador da família Microship PIC 16F8XX (mesma família do Basic Step) e transmissão de dados por meio de módulos de radiofrequência. Foram utilizados módulos de RF da Telecontrolli (RR3 e TR4) nas frequências de 433,92 MHz e 315 MHz. A taxa de transmissão aplicada foi de 2400 “bits” por segundo (bps) (taxa máxima permitida para o PIC 16F8XX). A estação de controle recebia e armazenava os dados em um microcomputador. Para a comunicação com o PC foi utilizado um pacote dividido em 3 partes: 1 “byte” inicial que indica o início do pacote, 1 bloco de dados e 1 “byte” final como indicativo de término do pacote. Segundo os autores, a distância é fator preocupante, sendo que quanto maior for, maior será a possibilidade de erros na comunicação dos pacotes. Ressaltam ainda, que a distância máxima entre transmissor e receptor é estabelecida pela altura das antenas que, quanto mais altas, maior será o alcance. Entretanto, antenas altas em terrenos abertos, como é o caso de um pivô central, comportam-se como pára-raios podendo comprometer, ou até mesmo inviabilizar a sua utilização.

Existem no mercado módulos transmissor/receptor de diversas marcas e modelos para diversas aplicações. A facilidade de se trabalhar com esses componentes permite ao usuário construir o seu próprio sistema de controle para aplicações especiais. Dispositivos como sistemas de alarme de carro, sistema de segurança residencial, controle remoto para abertura e fechamento de portões, controles para ligar e desligar luzes e eletrodomésticos, dispositivos sensores, aquisição e transmissão de dados e robótica em geral, podem ser implementados com certa facilidade, desde que se tenha conhecimento de eletrônica.

No mercado estão disponíveis modelos que operam nas frequências de 315 MHz, 418 MHz, 433,9 MHz, 900 MHz e outros. Segundo Messias (2005) os módulos que operam na frequência de 433,9 MHz são preferidos por serem mais facilmente encontrados no mercado.

Messias (2005) apresentou um sistema de controle de 8 dispositivos via RF utilizando módulos híbridos (TX/RX) conectados à porta paralela do PC, a qual é usada para gerar os endereços dos dispositivos controlados. Para transmitir dados de forma digital, pode se utilizar os

famosos e úteis circuitos integrados (CI's) MC 145026 ("Encoder") e o MC 145027 ("Decoder"), fabricados pela Motorola CO.

Os CI's MC 501426 e o MC 145027 possuem dois portadores diferentes de dados, sendo que uma das portas (5 "bits") deve ser utilizada para geração de endereços e a outra (4 "bits"), para a transmissão de dados ou controle de dispositivos. O CI MC 145026 pode combinar até 243 ($3^5 = 243$) endereços operando no modo trinário e até 32 ($2^5 = 32$) endereços operando no modo binário. Utilizando a porta de dados (4 "bits") pode-se controlar até 4 dispositivos em cada endereço ou transmitir até 16 ($2^4 = 16$) valores de dados digitais.

O modo binário é mais prático e fácil de ser utilizado, pois nele, é permitido apenas dois estados lógicos (nível 0 ou nível 1). Utilizando-se de combinação binária para geração de endereços e controlando apenas um dispositivo em cada endereço o número de dispositivos controlados pode ser aumentado para 128 ($2^5 * 4 = 128$).

Há no mercado de componentes eletrônicos outro "Decoder" da Motorola. É o MC 145028 que usa uma portadora de dados de 9 "bits", todos para o endereçamento tanto no modo binário quanto no trinário. Este é mais indicado para chavear endereços de controle remoto, possibilitando um máximo 19.683 ($3^9 = 19.683$) endereços no modo trinário e no máximo 512 ($2^9 = 512$) no modo binário.

Estes CI's ("Encoder/Decoder") podem trabalhar com uma conexão via cabo, com a vantagem de transmitir vários "bits". Eles transmitem tanto o endereço quanto o controle através de apenas dois fios, que são o fio de comunicação de dados e o fio terra. Pode-se, também, utilizá-los para uma comunicação sem fio, usando para isso, os módulos RF. Na comunicação sem fio o pino de dados do "Encoder" deve ser ligado ao pino de dados ("DATA") do Transmissor RF e do mesmo modo, o pino de dados do Receptor RF deve ser ligado ao pino de dados do "Decoder".

Para a utilização de módulos RF três detalhes devem ser observados com cuidado. O primeiro é o valor da frequência dos módulos, que devem ser idênticas tanto no transmissor quanto no receptor. A segunda é a largura da banda passante tanto do módulo transmissor quanto do receptor. O conhecimento da largura da banda é necessário para se projetar a frequência de oscilação do "Encoder/Decoder". A terceira é a antena, que deve ser calculada para cada frequência de forma precisa, a fim de permitir uma boa comunicação entre Transmissor e

Receptor. Segundo Messias (2005), pode-se utilizar um fio rígido de cobre (26AWG) como antena, o comprimento deve ser calculado para cada frequência.

Zerezuela e Oki (2003) desenvolveram um sistema de transmissão para aquisição de dados de estações meteorológicas em tempo real. Foi utilizado um transmissor de RF ligado à estação meteorológica para a transmissão dos dados. O recebimento foi feito por um receptor RF ligado a um microcomputador, que armazenava e disponibilizava os dados em página específica da internet permitindo o acesso em tempo real. Os autores compararam o sistema desenvolvido com um comercial e verificaram semelhança no desempenho, com a vantagem de ser um sistema de fácil utilização e baixo custo. Acrescentam ainda, como vantagem, o fato de ser um produto com tecnologia brasileira e manuais escritos em português.

2.7 Material e métodos

O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas. A primeira foi realizada no Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia Rural - LER da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ da Universidade de São Paulo - USP em Piracicaba, São Paulo e a segunda, na cidade de Barra do Bugres (180 km a NW de Cuiabá) em Mato Grosso.

Na primeira etapa foram construídos os “softwares” e “hardwares” necessários, além de testes com os transdutores de pressão, os módulos de rádio frequência, os microcontroladores Basic Step e tensiômetros.

Na segunda etapa foi montado um experimento em vasos para simular o monitoramento da umidade do solo e o controle da irrigação de um pivô central.

2.7.1 Descrição do material utilizado

Foi feita uma pesquisa junto ao mercado de componentes eletrônicos, através da internet, para buscar informações de produtos que pudessem atender as necessidades deste projeto. Os mais importantes são detalhados a seguir.

Na Figura 1 são mostrados os dois modelos de microcontrolador Basic Step que utilizados neste trabalho, sendo a Figura 1.a o modelo Basic Step OEM e a Figura 1.b o modelo Basic Step 1.

Figura 1 – Modelos do microcontrolador Basic Step utilizados, sendo o modelo OEM (a) e o modelo BS-1 (b)

O diagrama de pinagem dos modelos Basic Step OEM, LIGTH e BS1 são mostrados no anexo.

Na Figura 2 é mostrado o “display” de cristal líquido utilizado para visualização dos valores de leitura do A/D durante os testes de calibração dos transdutores de pressão. Este é o modelo LCD 16 x 2 sem “back ligh”, que permite escrever letras, números e até símbolos num total de 32 caracteres, sendo 16 em cada linha.

Figura 2 – “Display” usado para visualização dos dados processados pelo Basic Step

O “display” escolhido é o mais barato da linha fornecida pelo fabricante do Basic Step (Tato Equipamentos LTDA) e já vem de fábrica configurado para receber dados do microcontrolador, através do comando “serout” a uma taxa de 2400 “bits” por segundo (bps). Este “display” apresenta a desvantagem de permitir a escrita de um número reduzido de caracteres.

Os módulos de Rádio Frequência (RF) utilizados são da marca Keymark com alcance de 50 m a 100 m (segundo o fabricante), frequência de 315 MHz e 433,9 MHz e largura da banda de passagem de 1,5 kHz (Figura 3.a e 3.b). Ambos são alimentados com 5 Vcc.

Figura 3 - Receptor (a) e Transmissor (b) do módulo de radiofrequência Keymark (fonte: www.tato.ind.br)

Foram utilizados codificadores (“Encoder” MC145026) e decodificadores (“Decoder” MC145027) implementados em Circuitos Integrados (CI) para a geração de códigos de controle remoto via RF, ambos fabricados pela Motorola (Figura 4.a). Tanto o “Encoder” quanto o “Decoder” são CI’s de 16 pinos e podem ser alimentados com tensão de 3 a 18 Vcc. Portas lógicas da família TTL foram utilizadas nos circuitos periféricos. Os modelos utilizados foram: Inversora (74LS04) e OU (74LS32) (Figura 4.b).

Figura 4 – Circuito integrado MC145026 e MC145027 (a) e circuito integrado 74LS04 e 74LS32 (b)

Para proteção da porta paralela do computador pessoal (PC) utilizou-se, quando necessário, de acopladores ópticos do modelo TIL 111.

Foram utilizados diversos componentes eletrônicos discretos de várias especificações e modelos tais como: resistor, capacitor, transistor, diodo, relé, “reed switch”, fusível e regulador de tensão.

Para gravação dos programas no BS-1 foi utilizado o kit básico de gravação comercializado pela Empresa Tato Equipamentos Eletrônicos LTDA, o qual é constituído de uma fonte regulada, um cabo de comunicação serial e uma placa “Step Lab”, a qual é mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Placa Step Lab utilizada para gravação do programa no microcontrolador e testes do programa (Fonte: www.tato.ind.br)

Utilizou-se também, material para confecção artesanal de placas de circuito impresso como: papel contato, molde de papel, placa de fenolite cobreada de única face, ácido perclórico, furador de placas padrão, mini furadeira, estação de solda, etc.

Cabo de “mouse” contendo o conector DB-9 fêmea foi utilizado para comunicação serial com o computador. Foi necessário também, o uso de cabo blindado de 16 vias para comunicação paralela através da porta da impressora do computador, bem como de conectores DB-25 macho e fêmea.

Um transformador de tensão (110 / 12+12 Vca) foi utilizado para a construção de uma fonte regulada em ponte de diodos, com filtro capacitivo, a qual foi necessária para a alimentação dos circuitos periféricos.

Utilizou-se um computador pessoal com o “software” Delphi 3 (Borland) e o compilador Basic Step (Tato Equipamentos), os quais foram utilizados para criar os programas necessários durante o desenvolvimento deste projeto. Foi utilizado o “Windows” 98.

2.7.2 Teste de oscilação do par “encoder/decoder”

Foi montado um circuito (Figura 6) para verificar se o “Encoder” e o “Decoder” estavam oscilando na mesma frequência. Para este teste, os pinos A1 a A5 foram endereçados igualmente tanto no “Encoder” quanto no “Decoder”. As entradas D1 a D4 do “Encoder” foram codificados com uma sequência de bits conhecida. Aos pinos D1 a D4 do “Decoder” ligou-se “LEDs” (L1 a L4) para indicar a sequência de “bits” recebida. O LED LVT (LED Valid Transmit) é o indicador da recepção de dados, e emite luz quando estes estão sendo recebidos pelo decodificador. Neste teste foi montado um circuito similar àquele sugerido por Messias (2005), o qual utiliza um resistor (R_c) de 51 k ligado ao pino 13 do “Encoder”.

Para melhorar a transmissão de dados um potenciômetro foi instalado no lugar da resistência R_c . O valor desta foi variado até se obter uma comunicação satisfatória. O valor da mesma foi medido para posterior substituição por resistor comercial.

Figura 6 – Detalhe do circuito montado para testar a frequência de oscilação entre “Encoder” e “Decoder”

Verificada a eficiência de transmissão de dados via cabo foi montado um segundo teste dividindo o circuito anterior em dois e acrescentando a eles um transmissor e um receptor de rádio frequência. Sendo o transmissor ligado ao “Encoder” e o receptor ligado ao “Decoder”. Na Figura 7 são mostrados os dois circuitos separados e ligados aos módulos de rádio frequência.

Figura 7 - Detalhe dos circuitos, transmissor (a) e receptor (b), montados para testar a frequência de oscilação entre “Encoder” e “Decoder” com transmissão via rádio frequência

2.7.3 Montagem dos Módulos RF

A comunicação por RF foi feita em duas vias. A primeira foi responsável pela transmissão do código para selecionar qual bateria de tensiômetros seria monitorada e a segunda, pela

transmissão das leituras dos tensiômetros para o computador. Este primeiro par, foi constituído de um Transmissor (TX) e Receptor (RX), cuja frequência escolhida foi 315 MHz, estes operaram em sintonia com os circuitos integrados codificadores (“Encoder”) e decodificadores (“Decoder”) e funcionaram simplesmente como um controle remoto via RF. No segundo par TX/RX foram utilizados módulos de 433,9 MHz os quais foram conectados, através do pino de dados (“DATA”) do receptor, diretamente à porta serial do PC.

Os módulos de comunicação RF foram construídos, primeiramente, em matriz de contato para averiguação do seu correto funcionamento. Após a verificação preliminar, procedeu-se ao projeto de uma placa de circuito impresso para fixação dos componentes eletrônicos discretos que complementam o circuito RF, tanto do transmissor quanto do receptor. A montagem do circuito foi baseada nas sugestões de Messias (2005), com algumas modificações para atender às necessidades deste projeto.

2.7.3.1 Circuito de controle remoto

O circuito de controle remoto foi implementado a partir de um par TX/RX em conjunto com circuitos “Encoder/Decoder” da Motorola. O código de cada posição (ou setor) foi gerado pela porta paralela do PC, a partir de informações de um circuito identificador de posição da torre do pivô central.

Foram utilizados os 5 “bits” de saída (378h) da porta paralela, para geração de código e habilitação do transmissor com um sinal de acionamento. No referido código, o primeiro “bit” (D0) é o portador do sinal de acionamento. Quando este está em nível alto (1), significa que o circuito de monitoramento da umidade será ligado, quando em nível baixo (0), o circuito de monitoramento será desligado. Definiu-se como circuito de monitoramento aquele que fica anexo ao conjunto de tensiômetros. O segundo “bit” (D1) é responsável pela habilitação do “Encoder”. Quando este está em nível baixo o “Encoder” disponibiliza o endereço e o sinal de acionamento para o transmissor, quando em nível alto não o faz. Os próximos 3 “bits” (D2, D3, D4) foram utilizados para a formação do endereço no sistema binário, o que permitiu a construção de até 8 endereços. Os bits D5, D6 e D7 não foram utilizados neste circuito, porque se decidiu trabalhar com apenas 6 setores de monitoramento, mas foram utilizados em outro circuito para oferecer 3 opções de acionamento, por exemplo: Moto bomba, válvula, etc.

Na Figura 8 é mostrado o detalhe do circuito eletrônico desenvolvido para o acionamento remoto via radiofrequência. O sinal de acionamento proveniente do isolador óptico (TIL 111) é utilizado para o acionamento de um relê, o qual seleciona a informação a ser lida pela porta serial do computador (Mais detalhes serão dados quando for apresentado o circuito de comutação). O marcador de divisa é um pulso de entrada originado do identificador de posição do pivô e que representa a divisa imaginária entre dois setores.

Figura 8 – Detalhe do circuito de controle remoto (transmissor) via radiofrequência utilizando o codificador MC145026 e um transmissor de rádio frequência (TXC1) de 315 MHz da Keymarc

O circuito mostrado na Figura 8 fica ligado ao computador e é controlado pelo “software” PivoRF. Já o circuito mostrado na Figura 9 fica ligado ao circuito de monitoramento e faz o acionamento deste através do contato normalmente aberto (NA) do relê.

Figura 9 - Detalhe do circuito de controle remoto (receptor) via radiofrequência utilizando o codificador MC145027 e um receptor de rádio frequência (RXD1) de 315 MHz da Keymarc

Na Tabela 4 é mostrada a “Tabela Verdade” com as 12 condições possíveis, que representam os 6 setores monitorados, nos estados ligado e desligado.

Tabela 4 - “Tabela verdade” contendo o código dos 6 setores nas condições ligado e desligado

Setor	Pinos do registro de dados (378h)								Código Decimal	Situação
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0		
1	x*	x	x	0	0	0	0	0	1	desligado
	x	x	x	0	0	1	0	1	0	ligado
2	x	x	x	0	0	1	0	0	5	desligado
	x	x	x	0	0	0	0	1	4	ligado
3	x	x	x	0	1	0	0	1	9	desligado
	x	x	x	0	1	0	0	0	8	ligado
4	x	x	x	0	1	1	0	1	13	desligado
	x	x	x	0	1	1	0	0	12	ligado
5	x	x	x	1	0	0	0	1	17	desligado
	x	x	x	1	0	0	0	0	16	ligado
6	x	x	x	1	0	1	0	1	21	desligado
	x	x	x	1	0	1	0	0	20	ligado

*A letra “x” significa que os pinos D5, D6 e D7 da porta paralela estão abertos não importando o seus estados lógicos

O programa que gera o código o faz a partir da leitura do identificador de posição. Verifica-se pela Tabela 4, na coluna código decimal, que tanto o código liga quanto o desliga são incrementados de 4 unidades para cada setor. Para que o “software” funcionasse perfeitamente

foi necessário criar uma equação que convertesse o valor da posição, que identifica o setor, em código para cada setor. Verifica-se também que o código decimal do “liga” é igual ao código decimal do “desliga” mais 1. Para explicar o procedimento de dedução da equação que converte o valor da posição em código os dados da Tabela 4 foram resumidos e comparados na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação dos valores dos códigos, Liga e Desliga, com os valores de posição

Posição	1	2	3	4	5	6
Código Liga	1	5	9	13	17	21
Código Desliga	0	4	8	12	16	20

Observa-se que todas as três seqüências são progressões aritméticas. A posição é uma P.A. de razão 1 o tanto o código Liga quanto o Desliga são P.A. de razão igual a 4. Para se deduzir uma equação que transforma a posição em código pode-se partir de qualquer uma das seqüências (Liga ou Desliga), pois, a para se obter um código a partir do outro basta somar ou subtrair uma unidade. Escolheu-se a seqüência ‘Desliga’ (terceira linha da tabela 5) porque esta conduzirá a uma equação mais simples.

Na equação 1 é mostrado o termo geral de uma P.A.

$$a_n = a_i + (n - 1) r \quad (1)$$

em que:

a_n – é o enésimo termo da P.A.;

a_i – é o iésimo termo da P.A.;

n – é um termo qualquer da P.A.;

r – é a razão da P.A..

Associando-se as linhas 1 e 3 da Tabela 5 com os termos gerais da P.A. verifica se que:

$a_n = CD$; $a_i = 0$; $r = 4$ e $n = \text{Posição}$. Substituindo estes termos na eq. (1) obtêm-se a eq. (2).

$$CD = 0 + (P - 1) 4 \quad (2)$$

em que:

CD – número decimal que representa, em binário, o Código que Desliga o circuito de monitoramento;

P - número decimal que representa a posição da torre do pivô.

Simplificando a eq. (2) obtêm-se a equação geral, eq. (3), para ser usada no cálculo do código que desliga o circuito da posição P.

$$CD = 4P - 4 \quad (3)$$

O processo descrito pode ser repetido para a obtenção da equação do Código Liga, entretanto, com base nos dados da Tabela 5, pode-se definí-la conforme é mostrado na eq. (4).

$$CL = CD + 1 \quad (4)$$

em que:

CL - Número decimal que representa, em binário, o código que Liga o circuito de monitoramento;

Todos os receptores de endereço ficaram juntos aos tensiômetros e permaneceram ligados continuamente. A sua alimentação foi feita por um conjunto de 6 baterias de 1,5 V ligadas em série, o que dá 9 V. Para reduzir a voltagem de alimentação do circuito para 5 Vcc foi utilizado um regulador de tensão (7805), conforme mostrado na Figura 9.

Quando o computador envia um sinal endereçado à determinada posição, o codificador filtra este sinal e aciona o circuito de monitoramento dos tensiômetros daquele setor específico o qual passa a transmitir os sinais dos transdutores de pressão lidos pelo A/D. Quando o PC verifica que dados já foram recebidos de todos os tensiômetros, o mesmo envia um sinal que desliga o circuito de monitoramento daquele setor. O processo se repete até o pivô atingir a posição final completando o ciclo de irrigação.

2.7.3.2 Circuito de transmissão e recepção de dados

O circuito foi projetado para fazer uma varredura dos 5 canais do A/D, lendo cada transdutor individualmente. A rotina, programada no BS-OEM, responsável por este processo, inicia-se após o circuito, que contém o microcontrolador, ser alimentado, o que acontece quando o circuito auxiliar recebe o sinal de acionamento transmitido pelo computador, via rádio

freqüência. A rotina foi programada para fazer 5 leituras sucessivas de cada canal do A/D e enviar a média aritmética destas leituras, em Count, para o computador, via rádio freqüência.

Na Figura 10 é mostrado o circuito de monitoramento dos transdutores (tensiômetros) e transmissão da leitura destes, via rádio freqüência. Nesta Figura, os pinos 2 e 3 do conector DB-9 são utilizados para gravar o programa no microcontrolador Basic Step OEM.

Figura 10 - Detalhe do circuito de monitoramento que lê os transdutores de pressão e transmite os dados via rádio freqüência

O BS trabalha somente com números inteiros, sendo que o valor lido pode variar de 0 a 1023, para um A/D com resolução de 10 “bits” ($2^{10} = 1024 - 1$). Este valor lido representa um número binário resultado da conversão do sinal analógico do transdutor de pressão para um sinal digital. Este número posteriormente, já em ambiente Delphi, é convertido em tensão através da equação de calibração dos sensores e posteriormente são usados como parâmetro de entrada da equação de van Genuchten (1980) para a estimativa da umidade do solo.

À leitura média de cada canal do A/D foi acrescentado um valor inteiro, igual ao número identificador do canal (0, 1, 2, 3 e 4), multiplicado por 1500. Este artifício permitiu ao computador, através da rotina programada em Delphi, separar os dados de cada canal do A/D (Tabela 6) e assim associar o valor lido a cada tensiômetro em cada camada de solo.

Tabela 6 - Marcação dos valores lidos pelo Basic Step OEM, em função das leituras dos A/D's representativos de cada camada de solo, para serem enviados via radiofrequência

Camada	Nº do Canal	Leitura do A/D	Constante	Valor enviado
1	0	0..1023	0	0..1023
2	1	0..1023	1500	1500..2523
3	2	0..1023	3000	3000..4023
4	3	0..1023	4500	4500..5523
5	4	0..1023	6000	6000..7023

Na Tabela 7 é ilustrado o procedimento que foi utilizado para identificar de qual camada de solo, ou de qual tensiômetro o valor recebido era proveniente.

Tabela 7 – Separação dos valores recebidos via radiofrequência, em função de cada camada de solo

Valor recebido	Camada	Leitura do A/D
0...1023	1	0..1023
1500...2523	2	0..1023
3000...4023	3	0..1023
4500...5523	4	0..1023
6000...7023	5	0..1023

Este artifício foi utilizado para permitir que se pudesse trabalhar com camadas de solo de espessuras diferentes. Deste modo, cada tensiômetro pode monitorar uma faixa com espessura conhecida. A integração de todas as camadas permitiu conhecer a quantidade de água armazenada no perfil de interesse e assim, calcular com precisão a lâmina de irrigação a ser aplicada pelo pivô.

Aos dados enviados foram acrescentados caracteres conhecidos a fim de marcar o início e o final das mensagens, conforme sugestão de Einsfeldt e Wisintainer (2002). Utilizou-se do caractere asterisco (*, código 42 da tabela ASCII) como marcador de início e o caractere sustenido (#, código 35 da tabela ASCII) como marcador de final.

O circuito de recepção dos dados, mostrado na Figura 11, é o mais simples de todos os que foram utilizados. Constitui-se simplesmente de um módulo receptor de rádio frequência ligado à porta serial do computador. Existe a recomendação de se utilizar um circuito integrado (MAX 232) para ajustamento do sinal do rádio ao padrão da porta serial. Isto porque no sinal

disponibilizado pelo receptor de RF são utilizados 0 e 5 Vcc para definir os níveis baixo e alto, respectivamente, já no padrão RS232 os níveis baixo e alto são definidos por -12 Vcc e +12Vcc.

Figura 11 – Detalhe do circuito de recepção dos dados via rádio frequência

2.7.4 Circuito identificador de posição

A execução das rotinas do aplicativo computacional que faz a recepção, filtragem e interpretação das informações recebidas via RF, teve que ser amarrada com o deslocamento do pivô. Para isso, necessitou-se idealizar e implementar um sistema capaz de identificar o momento em que a torre passava pela divisão (imaginária) dos setores e de qual setor deveria ser obtidas as informações de tensão de água no solo.

Não foi possível a montagem e testes em um equipamento pivô central. Para simular um pivô e o movimento da sua torre foi projetado um sistema contendo uma haste móvel que gira com o acionamento de um motor. O sistema foi construído com um anel de madeira de 25 cm de diâmetro contendo em seu centro um motor de corrente contínua de 12 Volts, o qual contém anexo ao seu mecanismo um moto redutor. Ao eixo do moto redutor foi acoplada uma haste metálica de 30 cm. No anel foram fixadas outras 12 hastes espaçadas regularmente de 30 graus uma da outra, formando 12 setores circulares (fatias). Na ponta da haste móvel foi colocado um ímã e nas pontas das hastes fixas foram coladas chaves magnéticas (“reed switch”). A haste móvel foi posicionada a 1 cm acima das hastes fixas de modo que o ímã ao passar sobre as chaves magnéticas deixava um espaço livre de 0,3 a 0,5 cm, espaço este que foi suficiente para garantir o perfeito acionamento das chaves. Na Figura 12.a é mostrado o detalhe da fixação das chaves magnéticas na extremidade das hastes fixas e na Figura 12.b é mostrado o detalhe da fixação do ímã à haste móvel e do espaço livre comentado anteriormente.

Figura 12 – Detalhe da fixação do “reed switch” às hastes fixas (a) e fixação e espaçamento do ímã (b)

Entretanto, como se decidiu trabalhar apenas com 6 setores metade das hastes não foram utilizadas, sendo fixado “reed switch” em apenas 6 hastes, originando um espaçamento de 60 graus entre uma haste e outra. Na Figura 13.a é mostrado o esquema do referido sistema e na Figura 13.b é mostrada uma fotografia ilustrativa do mesmo, montado em uma bancada do laboratório.

Figura 13 – Esquema do simulador de deslocamento da torre do pivô (a) e fotografia ilustrativa do sistema construído

Foi feito um teste para averiguar o alcance magnético do imã sobre as chaves. Para isso as chaves foram ligadas a um circuito (Figura 14.a) que acionava um LED no momento em que as mesmas estavam fechadas. Foi medido, com o auxílio de um transferidor, o ângulo formado entre o eixo da haste móvel e o eixo da haste fixa no momento do acionamento e do desacionamento do LED. As duas medidas somadas forneceu o ângulo de ação do imã sobre as chaves. Na Figura 14.b é mostrado o detalhe da ligação dos fios provenientes dos “reed switch” ao circuito.

Figura 14 – Detalhe do circuito com um LED aceso (a) e ligação dos fios ao circuito (b)

Ao passar pelo sensor magnético este foi excitado e um sinal elétrico (pulso) foi enviado para os pinos do Basic Step 1, onde foi convertido em um número decimal representativo da posição do pivô. Em seguida, o BS-1 disponibilizou o valor da posição em um de seus pinos para transmissão serial para o computador.

A codificação da posição, ou seja, a transformação do referido pulso em um número decimal é feita no microcontrolador BS-1, através de um circuito projetado para esta função. Para isso, cada sensor magnético foi ligado a um ou mais pinos do BS-1. Como o microcontrolador possui apenas 8 pinos de entrada/saída, o número máximo de setores possíveis seria 8, que é uma quantidade muito baixa. Para expandir o número possível de setores foi preciso usar uma codificação binária, usando para isso, as instruções de comunicação paralela do BS. Deste modo foi possível expandir, teoricamente, o número de setores para 255 ($2^8 - 1 = 255$). O passo seguinte foi encontrar uma solução eletrônica que permitisse a geração binária das 255 posições possíveis.

Para isso, foram usados diodos em paralelo em número igual à quantidade de “bits” em nível alto da ‘tabela verdade’ (Tabela 8) para cada posição.

Tabela 8 – ‘Tabela Verdade’ das posições do pivô, ilustrando o número de diodos utilizados

Posição	Pino 0	Pino 1	Pino 2	Nº de diodos
*	0	0	0	*
1	0	0	1	Nenhum
2	0	1	0	Nenhum
3	0	1	1	2
4	1	0	0	Nenhum
5	1	0	1	2
6	1	1	0	2
*	1	1	1	*

*Códigos que não foram utilizados

Para que o circuito fosse capaz de identificar uma posição, foi preciso que pelo menos um “bit” estivesse em nível alto. Por esse motivo, a primeira combinação da “Tabela Verdade” (000) não foi utilizada. Foram necessários diodos somente onde a combinação binária teve mais de um “bit” em nível alto. Deste modo, não foram utilizados diodos nas posições ($2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^7$). Este procedimento permitiu (teoricamente) a combinação de 255 posições. Entretanto, como já foi comentado, decidiu-se trabalhar apenas com 6 posições por isso o circuito projetado e construído para tal função possui apenas 6 entradas. Mas, a metodologia é apresentada aos pesquisadores que quiserem aplicar o mesmo circuito em um sistema com maior número de posições.

No entanto, quando o pivô está entre uma posição e outra, o sensor magnético está aberto e o estado lógico nos pinos do BS fica indefinido, gerando com isso um conflito na codificação binária. Para que o circuito funcione corretamente é permitido apenas dois estados lógicos nos pinos do BS: Alto (1) e Baixo (0).

Essa situação foi contornada adotando o circuito proposto por Queiroz et al. (2002), o qual é mostrado na Figura 15. Este circuito utiliza tecnologia digital, através de portas lógicas inversoras, para definir um estado de saída a partir de um sinal de entrada. A porta lógica utilizada opera com o padrão TTL, ou seja, quando qualquer pino de entrada estiver aberto, o circuito interno considera como se estivesse em nível alto. O circuito proposto resolveu este problema.

O mesmo sinal que alimenta os pinos do BS-1 é condicionado e enviado à porta paralela (379h) para “despertar” o aplicativo, que lia através da porta serial (COM1), o valor da posição na qual o simulador do pivô se encontrava. Quando um pulso chegava a este pino o “software” era desviado para uma rotina que lia posição do pivô através da porta serial (via cabo).

O código que deu origem ao número representativo da posição é formado por 3 “bits”, que podiam assumir tanto nível baixo quanto alto, dependendo da posição. Portanto foi necessário desenvolver um circuito digital (Figura 17) para comparar e transformar estes 3 “bits” em um único sinal que foi usado para identificar a divisa entre dois setores diferentes.

Figura 17 – Detalhe do circuito digital que será utilizado como identificador de divisa – circuito teórico (a) e diagrama esquemático (b)

Nesta Figura a saída (pino 6 do CI) foi ligada ao pino 15 da porta paralela (S3). Foi este pulso que comunicou ao Programa PivoRF que o pivô estava na divisa imaginária de dois setores diferentes.

2.7.5 Circuito comutador de sinal

No presente projeto foi utilizada somente uma porta serial do computador (COM1) para ler, tanto a posição do pivô quanto o sinal do receptor de radiofrequência. Para isso, foi necessário construir um circuito para fazer a comutação da entrada serial do computador para as duas vias de sinais seriais. Um relê de 5 pinos, com um contato normalmente aberto (NA) e outro normalmente fechado (NF), foi utilizado. Quando o relê foi desligado o pino de dados do receptor de radiofrequência permaneceu conectado à entrada serial do computador, através do contato NF, e quando foi ligado, a saída serial do Basic Step, do circuito identificador de posição, foi conectada

à entrada serial do computador, através do contato NA. Detalhes do circuito comutador são mostrados na Figura 18.

Figura 18 – Detalhe do circuito comutador de sinal entre o receptor de radiofrequência e o circuito identificador de posição

Nesta Figura, o pino 7 do Basic Step é a saída de sinal serial disponibilizada pelo circuito identificador de posição e o pino 1 (/C0) do conector DB-25 é o pulso, gerado pela porta paralela, que aciona o relê, permitindo assim a comutação. O contato central do relê é ligado diretamente ao pino 2 (RX) do conector DB-9 que através dos contatos NA e NF recebeu dados tanto de posição quanto de leituras dos canais do A/D.

2.7.6 Percentímetro automático microprocessado

Houve a necessidade de se projetar um circuito dedicado ao controle do acionamento da última torre do pivô central, pois é a partir do movimento desta que as demais se movem. O movimento tangencial do pivô é controlado por um relê temporizador alojado junto ao painel de controle. A velocidade de deslocamento é ajustada por um potenciômetro que traz na sua escala não o valor da resistência, mas, a sua faixa de variação que vai de 0 a 100 %, por isso o nome percentímetro. A variação de 0 a 100 % está associada a uma escala de tempo de 60 segundos, sendo que quando o percentímetro está marcando 100 % a última torre fica 60 segundos ligada e 0 segundos desligada, quando em 50 %, 30 segundos ligada e 30 segundos desligada, e assim por diante.

Inicialmente pensou-se em um motor de passo, controlado por “software”, acoplado a um sistema de engrenagens, para fazer o ajuste do percentímetro. Entretanto, este método seria muito complicado. Portanto, partiu-se para o projeto de um circuito capaz de controlar o acionamento da última torre baseado no valor do percentímetro calculado pelo “software”. Para isso foi utilizado um microcontrolador Basic Step. O aplicativo construído para gerenciar o percentímetro funcionou da seguinte forma: quando o mesmo terminava de fazer a leitura de todos os tensiômetros de determinado setor ele calculava a lâmina requerida, o valor do percentímetro e o tempo em que a última torre devia ficar ligada. Isto feito, foi enviado um pulso através do pino 16 (C2) do conector DB-25 para o Basic Step e através do pino 3 (TX) do conector DB-9, o valor do tempo em que a última torre devia ficar ligada. Quando este valor era recebido pelo Basic Step o aplicativo calculava o tempo em que a última torre devia ficar desligada. A partir deste momento o aplicativo ficava oscilando entre duas rotinas de repetição: uma que ligava o relê durante o tempo recebido e outra que desligava o relê durante o tempo calculado.

Quando o aplicativo estava na rotina que ligava o relê, o pino 2 do Basic Step ficava em nível alto e quando não estava, ficava em nível baixo. Esta inversão foi utilizada para informar ao “software” a situação da última torre. Observe na Figura 19 que o referido pino do Basic Step está ligado ao pino 13 (S4) do conector DB-25, que é um pino para a entrada de dados no computador. Nesta Figura (19), o resistor de 22 k Ω em série com o pino 14 do Basic Step tem a finalidade de evitar danos ao microcontrolador. Foi indispensável a utilização deste.

Figura 19 – Detalhe do circuito utilizado para ajustar a velocidade da última torre do pivô central

Para a transmissão de dados do computador para o Basic Step, através da porta serial (COM1), foi preciso desabilitar o controle de fluxo. Na Figura 20 é mostrado como se fez para desabilitá-lo via “hardware”.

Figura 20 – Esquema ilustrativo das conexões que desabilitam o controle de fluxo via “hardware”

2.7.7 “Interface” PivoRF

Para cada problema encontrado um circuito foi desenvolvido e construído, o que levou a um grande número de circuitos (12 ao todo) montados individualmente em placas de circuito impresso. Estes circuitos foram montados e testados. A partir da confirmação do seu funcionamento, e com o objetivo de tornar o sistema prático e compacto, passou-se ao projeto de uma placa de circuito impresso que reúne em um só circuito a função de 10 dos 12 circuitos citados, ficando os outros 2 junto aos tensiômetros.

Esta placa foi quem faz a “interface” com o computador e foi chamada de “Interface” PivoRF. Na Figura 21 é mostrado o circuito da mesma.

Figura 21 – Detalhe do circuito da “interface” do aplicativo PivoRF

2.7.8 Fonte regulada

Projetou-se uma fonte regulada em ponte de diodos com filtro capacitivo, com o objetivo alimentar a placa PivoRF. Para isso utilizou-se como base os circuitos citados por Vilela (1999). Na Figura 22 é mostrado o detalhe do circuito projetado.

Figura 22 – Detalhe do circuito elétrico da fonte regulada em ponte de diodos com duplo filtro capacitivo

No projeto foi utilizado um transformador de tensão (Trafo) de 127 Vca para 12 Vca, com capacidade de corrente igual a 500 mA. Utilizou-se um fusível (F) de 500 mA como dispositivo de proteção contra curto circuito. Uma chave de manobra (Ch) foi adicionada para ligar e desligar a fonte. Na ponte do retificador foram utilizados diodos 1N4007 (D1, D2, D3 e D4). O filtro capacitivo foi feito a partir de dois capacitores em paralelo, sendo um de 1000 μF (C1) e outro de 100 μF (C2). Como indicador de funcionamento da fonte foi utilizado um LED vermelho de 3 mm (D5). Para limitar a corrente no LED (D5) utilizou-se um resistor de 1k Ω (R). Foram utilizados dois reguladores de tensão implementados em circuitos integrados, sendo um para regulação em +12 Vcc (CI-1 - 7812) e outro para regulação em +5 Vcc (CI-2 - 7805). A fim de facilitar a manutenção foi utilizado um soquete porta fusível (F). Os componentes eletrônicos discretos citados foram fixados por meio de solda em placa de fenolite cobreada de face única.

2.7.9 Teste das cápsulas dos tensiômetros

Os tensiômetros utilizados foram adquiridos da empresa Bravifer Indústria de Equipamentos e Acessória Agrônômica LTDA, sediada no município de Piracicaba/SP.

No Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP foi feito um teste de borbulhamento, a fim de verificar possíveis vazamentos, principalmente nos pontos de união das peças componentes do tensiômetro.

Os tensiômetros permaneceram imersos em água por 48 horas para perfeita saturação das cápsulas cerâmicas. Cada tensiômetro foi conectado, individualmente, a um compressor de ar, em série com uma válvula reguladora de pressão, que permitiu o acréscimo gradativo da pressão no interior do mesmo, até ser observando visualmente a formação de bolhas na superfície da cápsula que ficou imersa em água (Figura 23).

Iniciou-se o teste aplicando pressão de 101,32 kPa por 2 minutos, em seguida foi aplicada pressão de 151,98 kPa por mais dois minutos e a partir deste ponto foram feitos acréscimos sucessivos de 10,132 kPa a cada 2 minutos até que a cápsula atingisse o ponto de borbulhamento. A pressão correspondente ao borbulhamento foi anotada para posterior cálculo do coeficiente de variação.

Figura 23 – Detalhes do ensaio montado para fazer o teste de borbulhamento da cápsula dos tensiômetros

A literatura especializada recomenda também um teste para averiguação da condutância da cápsula cerâmica porosa. Entretanto, resultados experimentais (TEIXEIRA; COELHO, 2005;

BRASIL et al., 2003, entre outros) mostraram que, mesmo as cápsulas consideradas de qualidade inferior, disponíveis no mercado, apresentam condutância adequada. Diante disso, o referido teste foi suprimido.

2.7.10 Calibração dos transdutores de pressão

Neste trabalho foram utilizados transdutores de pressão da marca Motorola do modelo MPX5100DP (Figura 24.a). Eles possuem escala de leitura variando de 0 a 100 kPa. Foi adquirido um lote de 22 transdutores dos quais 12 unidades foram escolhidas aleatoriamente para a instrumentação dos tensiômetros.

Figura 24 – Foto do transdutor MPX5100DP da Motorola (a) e detalhe da identificação dos pinos e duas entradas de acesso à câmara sensítiva, vista frontal (b) e vista lateral (c)

Os pinos do transdutor são enumerados de 1 a 6. Pela Figura 24.b nota-se uma marca em forma de semi circunferência no pino mais à esquerda, que é identificado pelo número 1, através do qual se obtém o sinal de saída do transdutor. Os pinos 2 (GND) e 3 (+5Vcc) são usados para alimentação do transdutor.

Um teste de bancada foi feito para averiguar a resposta dos transdutores ao estímulo de sucção, simulando o tensiômetro. Cada sensor foi ligado individualmente a uma das entradas do

conversor A/D de um microprocessador Basic Step 1, programado para ler o A/D e enviar o sinal de leitura para um “display” de cristal líquido. Em paralelo com o sensor foi instalado um manômetro de mercúrio, para a comparação das leituras e ajuste de regressão. Segundo Teixeira e Coelho (2005) o tensiômetro convencional de mercúrio vem sendo utilizado como padrão de calibração de sensores de pressão. Cita-se, como exemplo de utilização de mercúrio como padrão para calibração de tensiômetros, os trabalhos de Camargo; Crohman e Camargo (1982), Vila Nova et al. (1992) e Assis Junior (1995). Na Figura 25.a e 25.b são mostrados a bancada e o circuito utilizados, respectivamente.

Figura 25 – Bancada utilizada para calibração dos transdutores de pressão (a) e detalhe do circuito utilizado (b)

Para simulação do efeito produzido pelo tensiômetro em condições de funcionamento tanto o transdutor, quanto o manômetro de mercúrio foram ligados a uma câmara hermeticamente fechada, onde foi produzido vácuo com auxílio de uma seringa de 50 cm³ (Figura 26).

Figura 26 – Detalhe da utilização da seringa para produzir vácuo dentro da câmara

O teste, feito em 50 % dos transdutores utilizados, reproduziu uma condição de secamento e de molhamento do solo. Para isso, iniciou-se o teste com a câmara na pressão atmosférica e em seguida, foram dados incrementos de tensão correspondentes a aproximadamente 8 cm na coluna do manômetro, até uma altura máxima de aproximadamente 70 cm de mercúrio, correspondendo a uma tensão 90 kPa.

Na Figura 27 é mostrado o detalhe do arranjo experimental utilizado para a calibração dos transdutores de pressão.

Figura 27 – Detalhe do ensaio de calibração do transdutor MPX5100DP feito em laboratório

Durante os testes um termômetro de mercúrio permaneceu em contato com o mercúrio dentro da cuba. A cada leitura a temperatura foi anotada a fim de se corrigir o valor da densidade do mercúrio em função da variação da temperatura (Figura 28.a e 28.b). O termômetro utilizado era graduado em 0,1 °C. Para maior precisão das leituras foi utilizada uma lupa.

Figura 28 – Vista geral do termômetro dentro da cuba (a) e detalhe do mesmo (b)

O valor da densidade do mercúrio, em função da temperatura, foi calculada com base nas informações contidas na Figura 29.

Adaptado: <http://www.hgtech.com/Data/Hg%20Properties/Hg%20Density.htm>

Figura 29 – Variação da densidade do mercúrio em função da temperatura

A câmara de vácuo foi construída utilizando-se de tubo de PVC (15 cm), fechado de um lado por um “cap” e pelo outro por um tubo de acrílico, onde na extremidade foi colocada uma borracha de tensiômetro de leitura digital de punção. No “cap” foi inserido um “T”, do qual se fez a derivação tanto para a conexão do sensor quanto do manômetro de mercúrio. A tensão reinante na câmara produziu igual efeito nos dois medidores instalados.

Os dados obtidos no teste (Tensão x Leitura do AD) foram submetidos a regressão linear.

Um segundo teste foi feito para avaliar a eficiência do transdutor e do microprocessador quando ligado ao módulo de transmissão de dados via RF. Neste teste, repetiu-se o mesmo arranjo experimental do primeiro. As leituras feitas no A/D do Basic Step 1 foram enviadas via RF para um computador, o qual utilizou um aplicativo desenvolvido em ambiente Delphi 3 para identificação dos dados recebidos e teste da equação linear ajustada. O ensaio foi repetido 3 vezes utilizando 3 sensores escolhidos aleatoriamente do grupo do 9 sensores utilizados no teste de calibração. Foram tomadas medidas em 10 pontos dentro da faixa válida para a equação ajustada, obtendo-se 3 leituras em cada ponto o que resultou em 30 amostras, as quais, foram utilizadas para teste de exatidão do transdutor de pressão.

Rodela (2003) apresenta uma metodologia, baseada no teste de t , para testar a exatidão de métodos alternativos de medição de variáveis físicas, químicas ou biológicas. Obtendo-se a equação de regressão linear, caso o coeficiente angular fosse diferente da unidade (1) e o coeficiente linear fosse diferente de zero (0) os resultados fornecidos pelos dois métodos seriam inteiramente concordantes. Sendo o coeficiente angular significativamente diferente de 1 isso, segundo Rodela (2003), corresponde a manifestação de um erro determinado proporcional; e caso o coeficiente linear seja diferente de zero isso corresponde a ocorrência de um erro determinado aditivo. Para comparações pelo teste de t foram calculados o desvio padrão da regressão (s), o desvio padrão do coeficiente angular (s_a) e o desvio padrão do coeficiente linear (s_b), segundo as eqs. (5), (6) e (7).

$$s = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_{est})^2}{n - 2}} \quad (5)$$

em que:

s - desvio padrão da regressão;

y_i - valor do potencial matricial medido pelo transdutor;

y_{est} - valor do potencial matricial estimado pela regressão;

n - número de pontos medidos.

$$s_a = \frac{s}{\sqrt{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}} \quad (6)$$

em que:

s_a - desvio padrão do coeficiente angular;

x - valor do potencial matricial observado no medidor padrão.

$$s_b = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}} \quad (7)$$

em que:

s_b - desvio padrão do coeficiente linear.

Para testar se o coeficiente angular é diferente de um (1) e o coeficiente linear é diferente de zero (0) calculou-se o valor de t com $(n-2)$ graus de liberdade para cada um deles e confrontou-os com o valor de t tabelado (eq. (8) e (9)).

$$t_a = \frac{a-1}{s_a} \quad (8)$$

em que:

t_a - valor de t calculado para o coeficiente angular;

a - valor do coeficiente angular.

$$t_b = \frac{b-0}{s_b} \quad (9)$$

em que:

t_b - valor de t calculado para o coeficiente linear;

b - valor do coeficiente linear.

O coeficiente angular não é estatisticamente diferente de 1, nem o coeficiente linear difere estatisticamente de 0 se os valores de t calculados não excederem o valor de t tabelado (t_{tab}) com $(n-2)$ graus de liberdade e a probabilidade desejada.

Na Figura 30 é mostrado o detalhe de ligação dos componentes eletrônicos utilizados para a transmissão das leituras do transdutor para o computador via radiofrequência.

Figura 30 – Detalhe do circuito eletrônico utilizado no teste de transmissão das leituras do transdutor para o computador, via RF

2.7.11 Teste de transmissão de dados via radiofrequência

Testes realizados em laboratório, com transmissão a curta distância (2 metros), a uma taxa de 300 bps, mostraram dificuldade de comunicação entre o módulo receptor e o computador. Foi verificado, inicialmente, um tempo médio de aproximadamente 10 min para que o aplicativo desenvolvido em Delphi conseguisse identificar as leituras referentes aos 5 canais do A/D. Para isso, a rotina de filtragem do sinal de radiofrequência era repetida, em média 1.000.000 de vezes.

Na tentativa de reduzir o tempo de leitura foi aumentada a taxa de transmissão para 2400 bps, que é a taxa máxima suportada pelo Basic Step. Observou-se que o tempo de leitura reduziu-se pela metade, aproximadamente 5 minutos. Entretanto, considerou-se não ser suficiente esta redução e partiu-se então, não havendo mais como aumentar a taxa de transmissão, para a tentativa de sincronização da velocidade de leitura com a velocidade de transmissão de dados.

Para tentar sincronizar a velocidade de execução da rotina no aplicativo com a velocidade de recebimento de dados no “buffer” da porta serial, foi inserida uma pausa em ms ao final da rotina que fazia a leitura dos dados recebidos pelo sistema de RF. Para descobrir o valor de pausa mais adequado foi realizado um teste, onde se variou o valor da pausa e anotou-se, o tempo gasto para a leitura dos 5 canais do A/D e o número de repetições da rotina. As pausas avaliadas foram de 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 ms. Na Figura 31 é mostrada variação no tempo de leitura em função da pausa.

Figura 31 – Variação do tempo de leitura em função da pausa inserida na rotina do aplicativo

Na Figura 32 é mostrada a variação no número de repetições da rotina de filtragem do sinal em função da pausa.

Figura 32 – Variação do número de repetições da rotina de filtragem do sinal em função da pausa inserida na rotina do aplicativo

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 31 e 32, optou-se por trabalhar com uma pausa de 5 ms na rotina de filtragem dos dados, esperando-se um tempo médio de 10 ms para a identificação das leituras referentes aos 5 canais do A/D.

O “software” e o “hardware” desenvolvidos foram testados em laboratório e no campo. O teste de campo foi feito para avaliar a distância máxima de comunicação conseguida com os módulos de rádio frequência. Para isso, o sistema foi montado em um campo aberto dentro do Campus da ESALQ (Figura 33).

Figura 33 – Fotografia da área onde foi realizado o teste de alcance dos módulos de rádio frequência

O computador foi ligado à um conversor de energia (Continua para Alternada) alimentado pela bateria de um carro. Próximo ao computador foi instalado um sistema de transmissão e recepção de sinais de rádio. Outro sistema de transmissão e recepção foi posicionado a 50, 100 e 150 metros do circuito central. Foi avaliada a capacidade do “software” e do “hardware” de transmitir e receber informações via RF.

2.7.12 Desenvolvimento dos “softwares” para o computador

Foram desenvolvidos Três “softwares” em linguagem Delphi, utilizando para isso o programa Delphi 3 da Borland. O primeiro foi chamado de PivoRFusuario, o segundo de PivoRFadministrador e o terceiro PivoRFmonitoramento. O nome PivoRF é devido ao “software” ter sido desenvolvido com o objetivo de monitorar a umidade do solo, em sistemas de

irrigação do tipo **pivô central**, a partir de tensiômetros, com transmissão de dados de tensão da água no solo via **radiofrequência**, e com base nos dados obtidos, controlar a velocidade do pivô, adequando a lâmina aplicada à necessidade de irrigação.

Os aplicativos apresentam pouca interação com o usuário, propositadamente com a intenção de simplificar o uso e evitar erros de configuração.

2.7.12.1 PivoRFusuário

Este aplicativo foi desenvolvido para desempenhar a função de controle do sistema de irrigação, adequando a lâmina aplicada a cada setor de interesse do irrigante, possibilitando assim uma irrigação de precisão. Para isso considerou-se a área circular descrita por um pivô central, dividida em setores (fatias). Na Figura 34 é mostrada esta divisão.

Figura 34 – Ilustração da divisão imaginária, em setores, da área irrigada por um pivô central

Como o microcontrolador utilizado para monitorar os sensores de umidade (tensiômetros instrumentados) possui um A/D de 5 canais foi considerada a possibilidade de instalação de até 5 tensiômetros em cada setor a critério do usuário.

Foram consideradas duas situações: a primeira quando o solo for homogêneo ao longo do perfil e a segunda quando este for heterogêneo. No caso de ser homogêneo uma única curva de retenção é suficiente para cada setor e neste caso os tensiômetros podem ser instalados em

profundidades regulares definindo camadas de mesma espessura. No caso do solo ser heterogêneo a espessura das camadas, ao longo do perfil, devem ser determinadas por um processo de avaliação do solo e neste caso provavelmente as camadas terão espessuras diferentes. Para este caso o usuário poderá ajustar uma curva de retenção individual, não somente para cada setor, mas para cada camada de solo. No caso de se escolher trabalhar com camadas homogêneas o número de curvas de retenção de água no solo será igual ao número de setores e no caso de camadas heterogêneas o número de curvas será o produto entre setores e camadas.

O aplicativo PivoRFusuario foi desenvolvido para monitorar a posição da torre do pivô e acionar, por controle remoto, o circuito de monitoramento do setor de interesse definido pelo identificador de posição (Figura 16). A identificação do setor será feita quando a torre do estiver sobre a divisa imaginária (Figura 34).

Com base nos valores de tensão calculados, a partir da leitura dos transdutores de pressão instalados nos tensiômetros, e na espessura de cada camada o aplicativo calcula a lâmina de irrigação requerida para cada setor. Se a opção escolhida pelo usuário for ‘solo heterogêneo’ o aplicativo estima a lâmina requerida pela eq. (10), pois neste caso, cada camada pode ter espessura diferente e curvas características individuais.

$$hr = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{cci} - \theta_i) z_i}{10} \quad (10)$$

em que:

hr – lâmina de irrigação requerida, em mm;

θ_{cci} – umidade na capacidade de campo (base volume), da i-ésima camada, em %;

θ_i – umidade atual (base volume) da i-ésima camada, em %;

z_i – espessura da i-ésima camada, em cm.

Na Figura 35 são apresentados detalhes da subdivisão da zona efetiva de raízes em camadas e a distribuição dos tensiômetros.

Figura 35 – Detalhe da subdivisão da zona efetiva das raízes em camadas e a distribuição dos tensiômetros

Para o caso de se escolher a opção ‘solo homogêneo’ pode se trabalhar com camadas de mesma espessura e neste caso a eq. (10) é simplificada para a estimativa da lâmina requerida, conforme mostrado na eq. (11).

$$hr = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{cc} - \theta_i) z}{10} \quad (11)$$

θ_{cc} - umidade na capacidade de campo (base volume), em todas as camadas, em %;

z – espessura das camadas, em cm.

Em seguida, considerando a opção escolhida, o aplicativo calcula o valor a ser ajustado no percentímetro para que o pivô seja capaz de aplicar a lâmina requerida. Para isso, é considerada a lâmina média mínima (h_{min}) de irrigação quando o pivô está funcionando com 100 % da velocidade da última torre. O valor a ser ajustado no percentímetro é calculado pela eq. (12).

$$Perc = \text{Trunc} \left(\frac{h_{\min}}{hr} 100 \right) \quad (12)$$

em que:

Perc - porcentagem que permite ao pivô aplicar a lâmina de irrigação requerida;

$h_{\min}$ - lâmina média aplicada com o pivô funcionando a 100% da velocidade da última torre.

A fim de evitar que o aplicativo ajuste valores muito baixos para o percentímetro foi inserida uma restrição que limita a lâmina mínima e o percentímetro, não permitindo a aplicação de lâminas menores do que a lâmina média mínima ($h_{\min}$) definida pelo programa PivoRFadministrador.

Tomando como base um intervalo de tempo de um minuto (60 s) o aplicativo calcula o tempo em que a última torre do pivô deve ficar ligada e o tempo que a mesma deve ficar desligada para aplicar, em média, a lâmina requerida (eq. (13) e (14)).

$$TL = \frac{60 Perc}{100} \quad (13)$$

em que:

TL = tempo em que a última torre do pivô deve ficar ligada, em s.

$$TD = 60 \frac{(100 - Perc)}{100} \quad (14)$$

em que:

TD = tempo em que a última torre do pivô deve ficar desligada, em s.

Na Figura 36 é mostrada a programação do aplicativo PivoRFusuario.

Figura 36 – Fluxograma para leitura da posição do pivô e dos canais do A/D, cálculo da lâmina requerida, ajuste do percentímetro e gravação de arquivo.

2.7.12.2 PivoRFadministrador

Este aplicativo foi construído somente para o administrador da irrigação e não tem aplicação em campo, devendo ser utilizado no escritório. A sua função é permitir a geração de arquivos de texto contendo informações do solo e do pivô de cada área irrigada. As informações que devem ser gravadas no arquivo são: a tensão de capacidade de campo (Ψ_{cc}), a tensão crítica (Ψ_{cr}), a lâmina média mínima com o pivô a 100% (L_{min}), o número de camadas por setor irrigado ($N_c/setor$), o número de setores irrigados (N° setores), o coeficiente angular da equação de calibração do transdutor de pressão (A), coeficiente linear da mesma equação (B), o comprimento dos tensiômetros utilizados, os parâmetros que habilitam ou desabilitam cada tensiômetro

individualmente, os dados da curva de retenção de água no solo (θ_s , θ_r , α e n) do modelo de van Genuchten (1980) e a espessura de cada camada.

Os dados da curva de retenção e espessura da camada são digitados em uma tabela que é gerada automaticamente pelo aplicativo no momento em que o administrador seleciona a opção ‘solo homogêneo’ ou ‘solo heterogêneo’. Para geração da referida tabela o aplicativo considera, também, as informações referentes ao número de setores e o número de camadas por setor, devendo estes dados ter prioridade no momento da entrada de dados. Os demais parâmetros são digitados em caixa de entrada de dados.

Após a digitação de todas as informações o administrador deve salvar o arquivo no seguinte diretório: C:\PivoRF\ArquivosPivoRF. O nome do arquivo fica a critério do administrador.

Na Figura 37 é mostrada a programação do aplicativo PivoRFadministrador.

Figura 37 – Fluxograma para entrada de dados e salvamento de arquivo

2.7.12.3 PivoRFmonitoramento

Foi construído um aplicativo, também em ambiente Delphi 3, para fazer o monitoramento dos circuitos desenvolvido a fim de se verificar a durabilidade das baterias e a eficiência dos circuitos de transmissão e recepção via rádio frequência. A este aplicativo foi dado o nome de PivoRFmonitoramento. O mesmo, quando iniciado, repete a rotina de leitura dos 5 canais do A/D a cada trinta segundos, salvando os dados lidos em um arquivo do Excel. Os dados salvos são: hora, o tempo gasto para a leitura dos 5 canais do A/D, o número de repetições da rotina que filtra os dados recebidos via RF e o valor, em Count, de cada um dos 5 canais.

Na Figura 38 é mostrada a programação do aplicativo PivoRFmonitoramento.

Figura 38 – Fluxograma para criar um arquivo de dados, fazer a leitura dos 5 canais do A/D e salvar os dados

2.7.13 Desenvolvimento dos “softwares” para o Basic Step

Foram desenvolvidos 3 aplicativos para o microcontrolador Basic Step. O primeiro (LeA/DTensiometro) é dedicado à leitura dos 5 canais A/D e transmissão dos dados via rádio. O segundo (LePosicao) foi desenvolvido para fazer a identificação da posição do pivô e envio desta para o computador e o terceiro (Percentimetro) comanda o percentímetro automático.

2.7.13.1 Aplicativo LeA/Dtensiometro

Este aplicativo, quando iniciado, faz 5 leituras de cada canal do A/D e em seguida calcula a médias destas. Ao valor médio, em Count, é acrescentada uma constante e este novo valor é utilizado na montagem da mensagem (*Média+Constante#) a ser enviada pelo transmissor de RF. Na Figura 39 é mostrada a sua programação.

Figura 39 – Fluxograma para leitura e envio de mensagem referente a cada canal do A/D

2.7.13.2 Aplicativo LePosicao

Este funciona como um “Loop” infinito e é iniciado toda vez que o microcontrolador for ligado. O aplicativo permanece fazendo a leitura do estado dos seus 8 pinos do Basic Step, convertendo a mesma para um valor decimal. Enquanto este valor for igual a zero, significa (Tabela 6) que a torre do pivô não está sobre uma das divisas imaginárias entre dois setores. Quando o valor lido for maior do que zero significa que a torre está sobre uma das divisas e o valor lido é a própria posição da torre. Quando isto ocorre o aplicativo monta uma mensagem (*Posição#) contendo a posição, e a envia para o computador via cabo serial. Na Figura 40 é mostrada a sua programação. Para garantir a eficiência da transmissão a mensagem foi enviada 10 vezes.

Figura 40 – Fluxograma para leitura e envio de mensagem referente à posição do pivô

2.7.13.3 Aplicativo Percentímetro

Este aplicativo se inicia mantendo o pivô a 100 %. Para isso, a rotina que liga a última torre é repetida 60 vezes com uma pause de 1 segundo, o que dá no final, um tempo acumulado de um minuto e a rotina responsável pelo seu desligamento não é executada. Enquanto o aplicativo estiver rodando qualquer umas destas rotinas ele estará verificando se há um sinal indicativo de que um novo valor para o percentímetro será enviado. Caso esta condição seja satisfeita o programa é desviado para uma rotina que recebe, via cabo serial, o novo tempo de ligamento (TLig) da última torre enviado pelo PivoRFusuario. Quando este valor é recebido o aplicativo calcula, por diferença (eq. 15), o tempo em que a torre deve ficar desligada.

$$TDeslig = 60 - TLig \quad (15)$$

em que:

TDeslig = Tempo de desligamento da última torre, em s;

TLig = Tempo de ligamento da última torre, em s.

Na eq. (15) 60 é o número de segundos de um minuto. Na Figura 41 é mostrada a sua programação.

Figura 41 – Fluxograma para o controle da última torre do pivô

2.7.14 Teste de geração de arquivos no formato XLS

Na Tabela 9 são mostrados os dados de solo utilizados para cada setor na simulação do salvamento de arquivos de dados pelo “software” PivoRFusuário, considerando que o solo apresenta perfil homogêneo.

Tabela 9 – Dados da curva de retenção e espessura da camada de solo utilizados para a simulação do funcionamento do “software” e do “hardware”, considerando o perfil do solo homogêneo

Setor	θ_{cc}	θ_r	α	n	z (cm)
1	0,33	0,11	0,874	1,869	20
2	0,34	0,12	0,874	1,869	20
3	0,35	0,13	0,874	1,869	20
4	0,36	0,14	0,874	1,869	20
5	0,37	0,15	0,874	1,869	20
6	0,38	0,16	0,874	1,869	20

Na Tabela 10 são mostrados os mesmos dados para a simulação, no caso de se considerar o perfil do solo heterogêneo.

Tabela 10 – Dados da curva de retenção e espessura da camada de solo utilizados para a simulação do funcionamento do “software” e do “hardware”, considerando o perfil do solo heterogêneo

Setor	Camada	θ_{cc}	θ_r	α	n	z (cm)
1	1	0,33	0,11	0,874	1,869	20
1	2	0,34	0,12	0,874	1,869	20
1	3	0,35	0,13	0,874	1,869	30
1	4	0,36	0,14	0,874	1,869	30
1	5	0,37	0,15	0,874	1,869	40

Durante os 12 dias de simulação foram gerados 452 arquivos a fim de verificar erros no salvamento dos dados. Foram gerados arquivos com as duas opções de solo: homogêneo e heterogêneo.

2.7.15 Simulação da utilização do “software” e do “hardware”

Na cidade de Barra do Bugres, MT, situada a 180 km a Noroeste da capital Cuiabá, foi montado um experimento para averiguação do funcionamento do sistema desenvolvido. Para isso foram utilizados 6 vasos de 20 litros contendo solo da região. Em cada vaso foram instalados 2

tensiômetros: 1 a 20 cm de profundidade e outro a 30 cm. Neste experimento cada vaso representou um setor (fatia) de um pivô central. Para simular o deslocamento da torre do pivô foi utilizado o esquema descrito no item 2.7.4.

Em cada tensiômetro foi acoplado um transdutor de pressão e o mesmo foi ligado ao circuito de monitoramento. Antes da instalação, os tensiômetros permaneceram imersos em água por 24 horas e o solo também foi saturado com 24 horas de antecedência. Na Figura 42.a é mostrada uma fotografia ilustrativa da montagem do transdutor ao tensiômetro. Observa-se que o mesmo foi montado com a entrada para baixo. Este procedimento evita que água do tensiômetro entre em contato direto com a membrana do transdutor. Para fixação ao tubo do tensiômetro foi usada cola Epóxi e para manter o transdutor na posição vertical foi utilizada fita adesiva. A conexão entre o tubo do tensiômetro e a entrada do transdutor foi feita com microtubo de polietileno, do tipo que é usado para ligação de microaspersores.

Figura 42 – Detalhe da montagem do transdutor de pressão no tensiômetro (a) e detalhe da instalação dos tensiômetros no vaso e ligação ao circuito de monitoramento (b)

O experimento foi montado em laboratório onde os vasos, contendo os tensiômetros juntamente com o circuito de monitoramento (Figura 42.b), foram posicionados a uma distância de aproximadamente 10 metros do computador com duas paredes de obstáculo. Na Figura 43 é mostrada uma fotografia da distribuição dos vasos.

Figura 43 – Detalhe da distribuição dos vasos no experimento

A simulação do monitoramento foi feita duas vezes por dia, às 7:00 e as 17:00 horas, durante 12 dias no período de 20/12/2006 a 31/12/2006. Os dados coletados foram utilizados para a construção de gráficos demonstrativos da variação da tensão e da umidade ao longo do período, em cada setor e camada avaliada. Neste teste considerou-se o solo homogêneo com camadas de mesma espessura.

Na Figura 44 é mostrado o comportamento das curvas de retenção dos solos utilizados na simulação. As mesmas foram geradas com os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) citados na Tabela 9.

Figura 44 – Comportamento das curvas de retenção geradas com os parâmetros da Tabela 9

Nesta simulação, para facilitar, o solo foi considerado homogêneo no sentido do perfil, mas heterogêneo ao longo de toda a área irrigada. Os dados dos outros setores são idênticos, por isso não foram citados.

Utilizou-se dos dados coletados também para a verificação da coerência e confiabilidade dos cálculos realizados pelo aplicativo PivoRFusuário.

2.7.16 Teste de durabilidade de baterias e eficiência dos circuitos RF

Este teste serviu para a averiguação de falhas na rotina que comanda a transmissão e recepção de dados via rádio frequência, visto que esta é a parte mais susceptível a falhas do aplicativo. Com os dados arquivados foi possível, também, calcular a média e o coeficiente de variação para o tempo de leitura, o número de repetições e para a leitura de cada canal.

O teste foi repetido até o esgotamento completo da carga das baterias. Foram utilizadas 6 pilhas do tipo AA. O circuito de monitoramento, como já foi dito, funciona com uma Diferença de Potencial de +5 Vcc. A corrente foi medida em duas situações: apenas com o receptor ligado e com o receptor e transmissor ligados. O número de acionamentos medidos multiplicado pelo tempo médio de acionamento permitiu estimar o tempo de duração das baterias e o tempo de funcionamento multiplicado pela corrente consumida permitiu conhecer a capacidade fornecimento de carga.

2.7.17 Avaliação da influência do comprimento do cabo de sinal dos transdutores

Foi realizado um teste para verificar a influência do comprimento do cabo de sinal que liga o sensor aos canais de entrada do A/D. Para isso, foram utilizados cabos com comprimentos diferentes, variando de 0,4 m até 14,2 m. Foi medida a Diferença de Potencial (DDP) na saída do pino do transdutor e na entrada do A/D e o valor da leitura do A/D enviado para o computador. As medidas foram tomadas de sensores instalados nos tensiômetros em vasos. O teste foi feito num intervalo de tempo de 20 minutos, para evitar uma possível variação da umidade do solo, influenciando nos resultados obtidos.

2.8 Resultados e discussão

Foram obtidos resultados referentes ao desenvolvimento, construção e avaliação do “software” e do “hardware”, além de calibração do transdutor, teste das cápsulas dos tensiômetros, duração das baterias utilizadas e comprimento dos cabos de ligação do sensor ao microcontrolador.

2.8.1 Oscilação do par “encoder/decoder”

Foi obtido o resultado esperado no teste de oscilação do par de circuitos utilizados para fazer a codificação e a decodificação dos sinais enviados via rádio frequência para o acionamento remoto do circuito de auxiliar. Inicialmente foi detectado apenas uma pequena falha devido à largura da banda de passagem, pois o circuito foi montado conforme sugestão de Messias (2005). O problema é que este autor utilizou em seu trabalho, módulos de rádio frequência da Telecontrolli, diferentes dos que foram utilizados neste trabalho (Keymark). No “site” do revendedor dos módulos Keymark há uma sugestão de que estes são compatíveis com os módulos Telecontrolli. Entretanto, durante os testes que foram realizados, em laboratório na cidade de Piracicaba, SP, foi notada uma pequena falha da decodificação dos sinais transmitidos. O problema foi contornado a partir do ajuste da resistência do oscilador (R_c), que deveria ser de $51\text{ k}\Omega$ segundo recomendação de Messias (2005). O novo valor foi descoberto acoplado no lugar da resistência R_c um potenciômetro de 0 a $100\text{ k}\Omega$. A resistência deste foi variada até se conseguir um resultado satisfatório da decodificação. A resistência R_c então foi medida com a utilização de multímetro encontrando-se um valor de $31,58\text{ k}\Omega$, para tanto foi utilizado um resistor de valor comercial igual a $33\text{ k}\Omega$. Após ter sido feita esta modificação não foram detectadas novas falhas no circuito.

2.8.2 “Hardwares” desenvolvidos

Os “hardwares” projetados e construídos foram testados individualmente e em conjunto. Os resultados mostraram bom funcionamento em ambos os testes. Durante os testes constatou-se apenas, dificuldade na locomoção dos circuitos devido ao excesso de fios e conexões. A

necessidade de melhoria no circuito, a fim de se conseguir um “hardware” de mais fácil utilização, motivou o projeto de uma única placa de circuito impresso para desempenhar todas as funções requeridas pelo “software”, a qual será mostrada mais adiante.

2.8.2.1 Circuito de controle remoto

Pela Figura 45.a visualiza-se a placa de circuito impresso, na qual está inserido o receptor (315 MHz), o decodificador (MC145027), um regulador de tensão e um sistema de acionamento por relê. Na Figura 45.b, é mostrada a placa de circuito impresso contendo o conector DB25, ligado à porta paralela, por onde se fez a codificação dos sinais de controle remoto. Nesta placa nota-se também a presença do codificador (MC145026) e o transmissor de RF (315 MHz), entre outros componentes. Estas imagens foram obtidas no início do desenvolvimento dos “hardwares” quando os circuitos ainda funcionavam em placas separadas. O circuito da Figura 45.a foi chamado de circuito auxiliar porque este desempenha somente a função de ligar e desligar o circuito de monitoramento que será mostrado à frente.

Figura 45 – Circuito receptor de código do controle remoto e acionamento do circuito de leitura dos sensores (a) e circuito do transmissor de códigos do controle remoto (b)

Durante os testes feitos, não foram detectadas falhas na codificação dos circuitos, como, por exemplo, o acionamento de dois ou mais circuitos ao mesmo tempo. Este resultado mostra que a tecnologia apresentada é confiável e tem grande potencial de utilização, não somente para

acionamento de circuitos eletrônicos, mas também de moto bombas, válvulas, e outros equipamentos utilizados na agricultura.

Nos testes realizados em Piracicaba, SP não foi identificado erro ou ineficiência na comunicação quando submetido a distância inferior a 50 m, tanto no laboratório quanto em campo aberto. Já nos testes feitos em Barra do Bugres, MT, notou-se falhas na recepção do sinal de acionamento do circuito de monitoramento nos dias de muito calor, principalmente nas horas mais elevadas do dia (16:00 as 19:00 horas). É possível que o aumento da temperatura possa ter interferido na transmissão dos dados. No entanto, como este efeito não foi previsto, não houve acompanhamento da variação da temperatura, nem ao longo do dia, nem ao longo do período de avaliação, mas as observações permitiram concluir que houve efeito da elevação da temperatura na transmissão de dados via rádio frequência.

Diante desta observação, dados referentes ao tempo de leitura dos canais do A/D, obtidos em horários diferentes em um mesmo dia foram comparados. Na Figura 46, são mostrados os tempos de 30 leituras dos 5 canais do A/D feitas em três horários do dia (8:00; 18:00 e 00:00 horas). Observa-se evidente variação no tempo das leituras feitas às 18:00 horas, coincidentemente este é o período do dia em que se nota maiores temperaturas. O coeficiente de variação foi de 0,50 %, 71,61% e 1,13 % para os horários de 8:00, 18:00 e 00:00 horas, respectivamente.

Figura 46 – Tempo de leitura do A/D medido em horários diferentes do dia 16/12/2006 em Barra do Bugres, MT

Pelos dados mostrados na Figura 45, não se pode afirmar que a variação observada é devido à variação da temperatura, entretanto, os resultados são sugestivos, visto que justamente no período mais quente do dia (18:00 horas) o tempo de leitura foi maior e mais variável. Em dias mais quentes a leitura ou comunicação RF nem foi possível, impedindo inclusive o acionamento do circuito de monitoramento por controle remoto.

Einsfeldt e Wisintainer (2002) comentam que, módulos de rádio frequência, do tipo dos que foram usados neste trabalho, utilizam a atmosfera como portadora. Isso pode explicar as falhas nos períodos de temperatura mais elevadas, pois, quanto maior a temperatura menos denso é o ar e, portanto, mais difícil a propagação das ondas de rádio.

2.8.2.2 Circuito de Transmissão de dados

Este é o circuito que faz o monitoramento dos tensiômetros, quando é ligado pelo circuito auxiliar. Na Figura 47 é mostrada a placa de circuito impresso que contem o microcontrolador Basic Step OEM e o transmissor (433,9 MHz).

Figura 47 – Circuito de monitoramento dos tensiômetros e transmissão via rádio frequência, vista lateral (a) e superior (b)

Sempre que este circuito é acionado o programa gravado na sua memória inicia o processo de leitura dos canais do A/D e a posterior transmissão dos dados para o computador. Nos teste feitos não foram detectadas falhas na execução do programa. O único inconveniente de se utilizar o microcontrolador Basic Step é a dificuldade de se construir o programa, pois, a sua memória para gravação do mesmo é muito limitada (256 “bytes”), o que exige um árduo exercício de raciocínio lógico a fim de se obter um programa o mais enxuto possível e que execute a programação necessária.

Durante os testes iniciais de transmissão, foi utilizado o programa HyperTerminal para visualização dos dados recebidos em tempo real. Verificou-se que quando a transmissão foi feita via cabo o sinal transmitido não continha caracteres estranhos (lixo), mas quando foi feita via rádio frequência notou-se a presença de muito lixo. Na Figura 48 é mostrada uma tela do HyperTerminal ilustrando as duas situações, sendo a primeira parte dos dados obtidos via rádio e a segunda via cabo.

Figura 48 – Tela do HyperTerminal mostrando a diferença entre a transmissão de dados via cabo e via rádio

Neste teste o microcontrolador Basic Step estava enviando dados da leitura de um sensor de pressão da família MPX. Os números 53, 54 e 55 que aparecem na tela são o resultado da leitura do A/D em Count. Os caracteres ‘*’ e ‘#’ são os marcadores de início (*) e final (#) da mensagem enviada. Estes caracteres foram necessários para permitir a programação de um ‘filtro’ no Delphi, o qual teve a função de separar a informação contida entre os marcadores citados.

Pelas imagens dos circuitos construídos, verifica-se que, estes são bastante compactos e simples e podem ser construídos por qualquer pessoa com um mínimo de conhecimento em eletrônica.

2.8.2.3 Circuito identificador da posição

Na Figura 49 é mostrada a placa de circuito impresso onde estão contidos a fonte regulada, o receptor (433,9 MHz) de dados dos sensores, o circuito identificador da posição do pivô, o receptor de sinal dos tensiômetros e o circuito comutador de sinal. Decidiu-se colocar todos estes circuitos numa mesma placa para facilitar a montagem e utilização, entretanto esta placa mostrada na Figura ainda não é a versão final da “interface” PivoRF.

Figura 49 – Primeira versão da “interface” PivoRF contendo o circuito identificador da posição, fonte regulada, comutador de sinal e o receptor de dados dos sensores

Os circuitos foram reunidos em uma placa também, devido à utilização de uma única porta serial do computador (COM1), para receber tanto o sinal da posição do pivô quanto o sinal de radiofrequência. Para isso, utilizou-se de um relê de 5 pinos, onde o pino do BS1 responsável

pela transmissão do valor da posição do pivô, foi ligado ao contato normalmente fechado do relê e o pino do receptor de radiofrequência foi ligado ao contato normalmente aberto do relê. Deste modo, pôde-se ler os dois sinais seriais pela mesma porta do computador, bastando para isso, ligar ou desligar o relê, o que é feito pelo programa PivoRF, através de um dos pinos da porta paralela (endereço 37Ah – bidirecional de 4 bits).

O circuito identificador da posição apresentou funcionamento satisfatório, não apresentando falhas durante os testes realizados. Inicialmente, quando o circuito foi idealizado e ainda estava montado em matriz de contato, foram feitas simulações alterando o estado lógico de 7 dos 8 pinos de I/O de um microcontrolador Basic Step. O último pino não foi utilizado porque este foi configurado para a saída de dados, o qual transmitiu os valores de posição lidos pelos demais pinos, para um “display” de cristal líquido. A combinação dos 7 pinos que foram configurados para a entrada de dados permitiu a identificação de 127 posições ($2^7 - 1 = 127$) que é o número máximo possível teoricamente.

O ângulo de ação do ímã foi de 7 graus, limitando em 51 o número de setores possíveis de se identificar com este tipo de sensor.

2.8.2.4 Circuito comutador de sinal

O circuito comutador de sinal também está impresso na placa mostrada na Figura 48. Inicialmente imaginou-se que a variação do campo magnético gerado pelo liga/desliga do relê fosse interferir nos dados transmitidos para computador via porta serial. Testes feitos com e sem a presença do relê, mostraram que não houve interferência detectável, mostrando que a sua utilização pode ser recomendada sem prejuízo na transferência de dados.

2.8.2.5 Percentímetro automático microprocessado

A única avaliação feita foi a observação do seu funcionamento durante os testes. Os resultados mostraram que o circuito proposto é confiável, sendo capaz de ajustar a velocidade da última torre em função da lâmina de irrigação requerida. Para a transmissão do valor do percentímetro do computador para o Basic Step foi necessário a utilização de um caractere conhecido a fim de sincronizar a recepção de dados. Para isso foi utilizado o caractere “A”

(Código 65 da tabela ASCII). O Basic Step só armazena o valor do percentímetro após ter recebido o caractere “A”.

É possível que o relógio temporizador do Basic Step não seja preciso, podendo ajustar tempos de Liga e Desliga um pouco diferentes dos que foram calculados. Entretanto, devido à dificuldade de se medir intervalos de tempos menores do que 1 segundo, utilizando-se de instrumentos simples, como cronômetro, por exemplo, não foi medido o erro de temporização do microcontrolador Basic Step.

2.8.2.6 Fonte regulada

A fonte construída foi utilizada para alimentar os circuitos de “interface” com o computador durante todo o tempo em que o sistema foi testado. Não houve falha da regulação da tensão e nem interferência no funcionamento do computador, já que o Terra desta fonte foi interconectado com o Terra do computador, para que ambos tivessem a mesma referência.

2.8.2.7 “Interface” PivoRF

Na Figura 50 é mostrada a placa de circuito impresso, que contem todos os circuitos utilizados para a “interface” com o computador. Em Piracicaba, esta placa passou apenas por um teste de condução das trilhas, já em Barra do Bugres, a mesma foi utilizada em todos os testes que foram realizados. Não foram observadas falhas em nenhum momento. Foram feitos cerca de 2000 testes durante o período de avaliação, não havendo falha em nenhum dos seus componentes.

Em 2000 testes o circuito de codificação endereçou 24.000 códigos de controle, sendo 12.000 para ligar e 12.000 para desligar o circuito de monitoramento dos seis setores utilizados nas simulações. O circuito identificador da posição leu e transmitiu a posição do pivô 12.000 vezes, para isso o circuito comutador de sinal realizou a comutação o mesmo número de vezes. Os módulos de rádio frequência também foram acionados 12.000 vezes, tanto os receptores, quanto os receptores. Não foi possível estimar o número de acionamento do percentímetro microprocessado porque, devido ao barulho inconveniente do relé, o mesmo permaneceu desligado durante a maioria dos testes. Estes resultados mostram a robustez dos componentes utilizados e da placa construída.

Os resultados encontrados são mais surpreendentes ainda quando se considera que a presente placa de “interface” foi construída artesanalmente.

Figura 50 – Placa de circuito impresso da “interface” PivoRF

2.8.3 Teste das cápsulas dos tensiômetros

O teste, realizado em 05/01/2006, revelou que todas as cápsulas avaliadas possui pressão de borbulhamento superior a 101,325 kPa. O valor médio encontrado para as 21 cápsulas testadas foi de 151,98 kPa ($cv = 3,28\%$), muito acima do mínimo limitante citado por Villagra et al. (1988), que é de 101,325 kPa.

O teste revelou, a partir de análise visual das condições de vedação do tensiômetro, que não havia pontos de entrada ou saída de ar, esperando assim, o bom funcionamento do instrumento.

2.8.4 Calibração do transdutor de pressão

Na Figura 51 é mostrado o resultado da calibração do transdutor de pressão modelo MPX5100DP da Motorola. Foram utilizados 9 transdutores de um lote de 18. Para a geração dos resultados, os transdutores foram ligados a um A/D com resolução de 10 bits, o que possibilitou a divisão da faixa de 0 a 5000 mV em 1023 ($2^{10} - 1 = 1023$) intervalos. A subtração de uma (1) unidade é devido ao fato de o zero ser, também, um valor válido na faixa de leitura do A/D.

Figura 51 – Correlação da leitura do conversor analógico digital (A/D) com a tensão medida no manômetro de mercúrio (Hg)

Verifica-se que a resposta do transdutor ao estímulo da tensão foi linear para a faixa de escala avaliada (0 a 90 kPa). Pela equação ajustada, em Piracicaba/SP, observa-se que em condições de saturação do solo ($\Psi_m = 0$ kPa) a leitura do A/D corresponde a um valor constante de 42,02 Count o que equivale a 205,4 mV.

O valor mínimo de DDP (mV) observado no pino de saída do transdutor foi, em média, de 205,4 mV (0 kPa) e o valor máximo, segundo o fabricante, pode chegar a 4500 mV, para uma tensão de 100 kPa. Em função disso, a faixa útil de DDP de saída do transdutor foi de 4294,6 mV para a variação de 0 a 100 kPa, o que leva a uma relação de $4,2946 \text{ mV kPa}^{-1}$. Comparando a

faixa de leitura do transdutor (Count) com a conversão do A/D, verifica-se uma relação de 8,79 Count kPa⁻¹, o que fornece uma precisão de 0,11 kPa.

Pela equação obtida, pode-se definir a faixa de medida no intervalo de 0 a 90 kPa, podendo esta ser expandida até 100 kPa. O alcance para medida de tensão da água no solo é de 90 kPa. A histerese não foi avaliada, pois a experiência com outros modelos de Transdutores da mesma família, indicam que a mesma é muito pequena e pode ser desconsiderada.

Informações contidas na folha de dados (“datasheet”) do transdutor indicam a presença de um termistor para a compensação da variação da temperatura. Por esse motivo não foi feita uma nova calibração para os testes realizados em Barra do Bugres, MT.

Na Figura 52 é mostrada a reta 1:1 (Transdutor x Manômetro de mercúrio) onde se observa comportamento linear e coeficiente de determinação 0,999. Resultado semelhante foi obtido por Teixeira e Coelho (2005). Os autores também constataram a repetibilidade no comportamento do sensor, quando comparado com o tensiômetro de mercúrio em um segundo ciclo de secamento do solo.

Figura 52 – Comparação das leituras realizadas pelo transdutor de pressão (MPX5100DP) e do manômetro de mercúrio (Hg)

Na Tabela 11 é mostrado o resultado do teste de exatidão feito para o transdutor de pressão, comparado ao manômetro de mercúrio.

Tabela 11 – Relação dos dados obtidos na avaliação da exatidão do transdutor de pressão MPX5100PD, com 28 graus de liberdade e 99,9% de probabilidade

S	S _a	S _b	t _a	t _b	t _{tab}
0,30324	0,00186	0,32675	0,49050	0,34694	3,674

Nota-se que os valores de t calculados não excederam o valor tabelado, indicando com isso, que o coeficiente angular não é estatisticamente diferente de 1 e nem o coeficiente linear é, estatisticamente, diferente de 0. Deste modo, ambos os métodos (manômetro de mercúrio e transdutor de pressão) podem ser utilizados para medição da tensão da água no solo com precisão equivalente, não sendo afetados por erros determinados. Este resultado justifica a utilização de sistemas de automação da irrigação com o uso de tensiômetros, principalmente quando for possível se utilizar um sistema de transmissão de dados via rádio frequência.

2.8.5 Alcance dos módulos de rádio frequência

Na Tabela 12 é mostrado o resultado do teste de alcance dos módulos de rádio frequência. Observa-se, que, a comunicação entre transmissor e receptor ocorreu de maneira satisfatória quando a distância entre eles foi de 50 metros, sendo notado apenas uma falha. Já quando a distância foi aumentada para 100 metros o sistema de comunicação RF não se mostrou confiável, apresentando 40 % de falha. Quando a distância entre transmissor e receptor foi de 150 m não foi possível a comunicação em nenhuma das repetições, apresentando neste caso 100 % de falha. Os dados obtidos confirmam a informação do fabricante dos módulos que de que o alcance destes pode chegar a 100 metros, entretanto, para uma aplicação segura é recomendável trabalhar com distâncias inferiores a 50 metros.

Tabela 12- Resultado do teste de alcance dos módulos de rádio frequência, em três distâncias diferentes, realizado em campo aberto, em Piracicaba, SP

Repetição	Tempo de leitura (s) para cada uma das simulações		
	50 m	100 m	150 m
1	15 seg.	70 seg.	Não leu
2	Erro Fatal*	Não leu**	Não leu
3	32 seg.	20 seg.	Não leu
4	21 seg.	Não leu	Não leu
5	23 seg.	35 seg.	Não leu
6	25 seg.	24 seg.	Não leu
7	24 seg.	40 seg.	Não leu
8	22 seg.	28 seg.	Não leu
9	23 seg.	Não leu	Não leu
10	22 seg.	Não leu	Não leu

*Mensagem do Windows; **O aplicativo não foi capaz de ler os canais do A/D em 1.000.000 de tentativas

2.8.6 Aplicativos desenvolvidos para o computador

Os resultados, obtidos a partir da observação, mostraram que os “softwares” atenderam às expectativas iniciais, se mostrando adequados e eficientes para aplicação. As três versões desenvolvidas: PivoRFusuario (1709 linhas de código); PivoRFadministrador (509 linhas de código) e PivoRFmonitoramento (208 linhas de código), são apresentadas no CD-ROM em anexo.

No teste realizado em Piracicaba, SP, para verificar o desempenho do aplicativo PivoRFusuario na filtragem dos dados recebidos, eliminando os ruídos indesejáveis, constatou-se que, para o programa conseguir identificar o sinal referente à leitura de cada um dos 5 tensiômetros, foi preciso repetir a rotina, em alguns casos, até 600.000 vezes. Para isso o tempo gasto foi de 60 segundos, em média.

Uma mensagem de erro fatal foi detectada algumas vezes. Quando este erro ocorria era mostrada na tela do computador a mensagem “Erro Fatal: str não é um valor inteiro válido” (a mensagem foi traduzida para o português). Na rotina programada em Delphi str é o nome da

variável que armazena a mensagem recebida via RF, após esta ter passado pelo algoritmo de filtragem do sinal. Logo após a finalização da filtragem esta variável era convertida de texto para número inteiro, e era no momento da conversão que ocorria o erro fatal.

Após várias dezenas de tentativa descobriu-se que a variável, que deveria conter um valor inteiro, na verdade estava vazia. Um erro na transmissão de dados pode ter gerado uma sequência de dados falsa contendo um caractere marcador de início da mensagem seguido de um caractere marcador de final (*#). Quando esta sequência falsa entra na rotina de filtragem, a variável recebe e armazena o que está contido entre os marcadores, ou seja, nada.

Na Figura 53 é mostrada parte da tela de código da referida rotina ressaltando a linha que apresentava falha.

```

Unit1.pas
Unit3 Unit1

    Str := Str + Aux;
end; //end While Aux <> '#' Do

k := Length(Str);
For i := 1 To k Do
begin
    Tpm := Str[i];
    If (Tpm < Chr(48)) Or (Tpm > Chr(57)) Then
    begin
        Aux := 'erro'
    end; //End If (tpm < Chr(48)) Or (tpm > Chr(57)) Then
end; //For i := 1 To k Do
If Aux = 'erro' Then
    Str := ''
Else
begin
    Case StrToInt(str) Of
        1500..2523 : Edit7.Text := str;
        3000..4023 : Edit8.Text := str;
        4500..5523 : Edit9.Text := str;
        6000..7023 : Edit10.Text := str;
        7500..8523 : Edit11.Text := str;
    end; //end Case StrToInt(str) Of
end;

```

Figura 53 – Cópia da tela de código contendo parte da rotina responsável pela filtragem dos dados recebidos pelo rádio, destacando a linha que retorna o erro

Na tentativa de resolver o problema foi inserida uma linha condicional que verifica se a variável está vazia antes de entrar na rotina de filtragem. Caso esteja vazia, o programa atribui um caractere não numérico, por exemplo, 'x' à variável. Quando a variável contendo 'x' entra na rotina de filtragem, o programa identifica-a como texto, a descarta, e reinicia o processo. Após

este ajuste o programa foi repetido 1250 vezes seguidas e a mensagem de ‘erro fatal’ não foi detectada novamente, indicado que possivelmente o problema tenha sido resolvido.

Na Figura 54 é mostrada parte da tela de código desta rotina destacando a linha que foi acrescentada com o objetivo de eliminar o erro citado.

```

Unit1.pas
Unit1

If (Aux <> '*') and (Aux <> '#') Then //If 2
  Str := Str + Aux;
end; //end While Aux <> '#' Do
If (Str = '') Then Str := 'x';
k := Length(Str);
For i := 1 To k Do
begin
  Tpm := Str[i];
  If (Tpm < Chr(48)) Or (Tpm > Chr(57)) Then
  begin
    Aux := 'erro'
  end; //End If (tpm < Chr(48)) Or (tpm > Chr(57)) Then
end; //For i := 1 To k Do
If Aux = 'erro' Then
  Str := ''
Else
begin
  Case StrToInt(str) Of
    1500..2523 : Edit7.Text := str;
    3000..4023 : Edit8.Text := str;
    4500..5523 : Edit9.Text := str;
    6000..7023 : Edit10.Text := str;
    7500..8523 : Edit11.Text := str;
  end; //end Case StrToInt(str) Of

```

Figura 54 - Cópia da tela de código contendo parte da rotina responsável pela filtragem dos dados recebidos pelo rádio, destacando a linha que foi acrescentada

Em relação aos códigos dos endereços gerados para o controle remoto via porta paralela, verificou-se total eficiência, não sendo identificados erros de endereçamento durante nenhum dos testes realizados.

Na Figura 55 é mostrada a variação do tempo gasto para que o aplicativo fosse capaz de ler os 5 canais do A/D via rádio frequência.

Figura 55 – Variação do número de tentativas e do tempo gasto para ler os 5 canais do A/D

Verifica-se que não há uma relação direta entre o número de leituras e o tempo gasto para executar esta tarefa. O tempo médio observado foi de 9,24 segundos para a leitura e o número médio de tentativas foi de 1392. O coeficiente de variação para o número de tentativas foi de 12,19 %, já para o tempo de leitura foi de 2,93%. A maior variação do número de tentativas é resultado da rotina de filtragem do sinal dos rádios que é variável em função do tamanho das mensagens, pois estas podem ter tamanhos diferentes em função de interferências tanto na transmissão quanto na recepção dos dados. Para melhor visualização deste efeito foi calculado o número médio de tentativas por segundo nos 1250 testes. O resultado é mostrado na Figura 56.

Figura 56 – Número de tentativas realizadas por segundo na leitura do A/D

2.8.6.1 PivoRFusuario

Na Figura 57 é mostrada a Tela inicial do aplicativo PivoRFusuario. Nesta tela é feita uma referência ao Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, data e local de desenvolvimento do aplicativo e o nome dos autores. O botão ‘Cancelar Introdução’ (canto inferior esquerdo) permite ao usuário pular a introdução e entrar direto na tela principal. O botão ‘Repetir Introdução’ (canto inferior direito) permite ao usuário rever a introdução e o botão ‘Click para Iniciar’ (posicionado entre os outros dois) permite ao usuário mudar para a tela principal. Durante a execução da introdução o botão ‘Cancelar Introdução’ recebe o foco podendo ser acionado pressionando a tecla “Enter” do teclado. O mesmo ocorre com o botão ‘Click para Iniciar’ quando a introdução for finalizada ou a tecla “Enter” for pressionada uma vez.

Figura 57 – Tela inicial do programa PivoRFusuario

Na Figura 58 é mostrada a tela principal do programa.

Figura 58 – Tela principal do aplicativo PivoRFusuario

O painel no canto superior esquerdo é onde são mostradas informações como o nome do arquivo onde serão gravados os dados lidos e calculados, a porta serial que está sendo utilizada, o código que liga e desliga o circuito de monitoramento dos tensiômetros via rádio frequência e o tempo gasto para a leitura de todos os cinco canais do A/D. Na barra superior, onde está escrito ‘Aguardando Instrução’, é mostrado cada tarefa que está sendo executada pelo programa, em tempo real. Na tabela são mostrados dados referentes à posição do pivô, ao horário de leitura dos tensiômetros, à lâmina requerida e ao valor do percentímetro, nesta ordem da esquerda para a direita. No painel de controle do sistema são mostradas três opções de acionamento: Pivô, Bomba e Válvula. Para acionar qualquer um destes equipamentos basta clicar no respectivo botão. O mesmo botão serve para ligar e desligar, no caso do pivô e da bomba, e para abrir e fechar no caso da válvula. Quando a bomba e o pivô estiverem desligados nos seus respectivos botões estará escrito ‘Ligar’, e quando estiverem ligados, estará escrito ‘Desligar’. O mesmo ocorre com o botão de acionamento da válvula que alterna entre ‘Abrir’ e ‘Fechar’. A parte reservada para a

última torre serve apenas para indicar se a mesma está ligada ou desligada, já que o seu acionamento é feito automaticamente pelo percentímetro.

No painel do canto inferior direito é mostrado o valor do percentímetro e o tempo em que a última torre deve ficar ligada e desligada para que seja aplicada a lâmina requerida. A imagem esquemática, alusiva ao sistema PivoRF, no canto esquerdo inferior, é apenas uma ilustração da comunicação do computador com o tensiômetro.

Observa-se, ainda nesta Figura, a barra de menus com o menu ‘Arquivo’ e o menu ‘Configurações’. No menu ‘Arquivo’ o usuário tem opção de abrir um arquivo, começar uma aplicação ou sair do programa. Por medida de segurança, os submenus ‘Abrir’ e o ‘Começar’ ficam desabilitados inicialmente. O submenu ‘Abrir’ é habilitado somente após o usuário escolher o tipo de solo (homogêneo ou heterogêneo) e o submenu ‘Começar’ é habilitado somente após o usuário ter aberto um arquivo de dados. No menu ‘Configurações’ o usuário tem apenas duas opções: escolher o tipo solo e definir a porta serial a ser utilizada.

Na parte inferior da tela principal aparecem dois botões. O da esquerda tem a mesma função do submenu ‘Começar’ e o da direita, como o próprio nome indica, finaliza o programa.

Na Figura 59 são mostrados os seus menus e submenus. No submenu ‘Configurações’ as opções padrões são: ‘Camadas Homogêneas’ e ‘Porta serial COM1’, e podem ser detectadas pela marca que antecede as palavras Homogêneas e COM1. Quando outra opção é selecionada a marcação (Checked) se move para a mesma.

Figura 59 – Sub menus do menu arquivo (a), Sub menus do menu configurações destacando as opções de camadas de solo (b) e opções de configuração da porta serial (c)

Quando o usuário clica no submenu ‘Abrir’ uma caixa de diálogo aparece na tela do computador. É a partir desta que se localiza o arquivo de dados a ser aberto para alimentar o programa (Figura 60).

Figura 60 – Tela da caixa de diálogo do submenu abrir

A caixa de diálogo, no momento em que é aberta, já mostra todos os arquivos gravados no diretório C:\PivoRF\ArquivosPivoRF, onde deverá haver um ou mais arquivos de dados gerados pelo PivoRFadministrador. Para abrir o arquivo basta selecioná-lo com o “mouse” ou cursor (setas) e clicar em abrir (botão inferior direito) ou pressionar a tecla “Enter”.

Toda vez que o usuário inicia uma aplicação o “software” cria um arquivo no formato XLS para gravação das informações geradas durante o monitoramento da umidade e ajuste da lâmina de irrigação. O nome deste arquivo é apresentado na tela, ficando visível no painel superior esquerdo onde se lê ‘Nome do Arquivo = ...’ (Figura 61).

Figura 61 – Apresentação do nome do arquivo criado para gravação dos dados gerados durante a irrigação

O nome do arquivo, conforme foi proposto, facilita a identificação dos dados de cada irrigação. Considerando, como exemplo, para uma cultura que tenha um ciclo de 120 dias e uma frequência média de irrigação de 4 dias, serão acumulados na pasta DadosPivoRF 30 arquivos. Para evitar o acúmulo excessivo de arquivos o usuário pode, ao final de cada ciclo da cultura, copiar os arquivos em um CD e limpar a pasta.

No aplicativo PivoRFusuário não existe a opção de imprimir os dados, se houver necessidade de se fazer isto, deve-se fazê-lo por outro programa que aceite arquivos no formato XLS.

A formatação do arquivo de dados muda conforme o tipo de solo escolhido. Na Figura 64 é mostrada a imagem de um arquivo de dados de uma simulação com solo heterogêneo.

Setor	Data	Hora	Tensiômetros	Pot. (kPa)	Umid. (%)	Z (cm)	L (mm)	Perc (%)
1	24/12/06	23:08:44	1	5,1	16,84	20	0	100
2	24/12/06	23:08:44	2	3,56	19,78	20	0	100
3	24/12/06	23:08:44	3	0	0	20	0	100
4	24/12/06	23:08:44	4	0	0	20	0	100
5	24/12/06	23:08:44	5	0	0	20	0	100
1	24/12/06	23:09:25	1	4,78	17,16	20	0	100
2	24/12/06	23:09:25	2	3,13	20,59	20	0	100
3	24/12/06	23:09:25	3	0	0	20	0	100
4	24/12/06	23:09:25	4	0	0	20	0	100
5	24/12/06	23:09:25	5	0	0	20	0	100
1	24/12/06	23:11:14	1	5,1	16,84	20	6,055	82,57
2	24/12/06	23:11:15	2	3,56	19,78	20	8,223	60,808
3	24/12/06	23:11:16	3	0	0	20	8,223	60,808
4	24/12/06	23:11:17	4	0	0	20	8,223	60,808
5	24/12/06	23:11:18	5	0	0	20	8,223	60,808
1	24/12/06	23:11:49	1	4,78	17,16	20	5,421	92,228
2	24/12/06	23:11:50	2	3,13	20,59	20	5,977	83,658
3	24/12/06	23:11:51	3	0	0	20	5,977	83,658
4	24/12/06	23:11:52	4	0	0	20	5,977	83,658

Figura 64 – Arquivo de dado salvo pelo PivoRFusuário quando se trabalhou com camadas heterogêneas

2.8.6.2 PivoRFadministrador

A versão *administrador* do programa PivoRF apresenta a mesma tela inicial da versão *usuário*. A sua tela principal é mostrada na Figura 65. Verifica-se na parte superior uma tabela,

na qual devem ser digitados os dados da curva de retenção e a espessura das camadas de solo. Abaixo se observa 4 painéis. No primeiro estão as caixas de entrada de dados do solo (Potencial para umidade de Capacidade de campo - Ψ_{cc} , Potencial para a umidade crítica - Ψ_{cr}) e do pivô (Lâmina mínima aplicada pelo pivô - L_{min} , Número de camadas por setor - N_c/setor e Número de setores de irrigação - N° Setores), no segundo estão as caixas para entrada de dados referentes aos parâmetros de ajuste da equação do transdutor de pressão utilizado (Coeficiente angular - A e Coeficiente linear - B), no terceiro estão as caixas para entrada de dados referente ao comprimento de cada tensiômetro e o quarto painel contém um figura ilustrativa da determinação do comprimento do tensiômetro.

Os números '1' e '0' que aparecem do lado direito do comprimento são utilizados para habilitar ou desabilitar os tensiômetros. Quando for digitado o valor '1' a leitura daquele tensiômetro será considerada no cálculo da lâmina de irrigação e quando o valor for '0' a leitura será desconsiderada.

Setor	Us (cm³/cm³)	Ur (cm³/cm³)	alfa	n	Z (cm)
1	0,33	0,11	0,874	1,869	20
2	0,34	0,12	0,874	1,869	20
3	0,35	0,13	0,874	1,869	20
4	0,36	0,14	0,874	1,869	20
5	0,37	0,15	0,874	1,869	20
6	0,38	0,16	0,874	1,869	20

Dados do solo e pivô

Ψ_{cc} (kPa) 6

Ψ_{cr} (kPa) 50

L_{min} (mm) 4

N_c/setor 5

N° Setores 6

Equação do transdutor de pressão

A 0,10762

B -4,52238

Ψ (kPa) = A*X + B

Comprimento dos tensiômetros (cm)

T1 40 1

T2 60 1

T3 60 0

T4 60 0

T5 60 0

Figura 65 – Tela principal do aplicativo PivoRFadministrador

No menu ‘Arquivo’ (Figura 66) existem as opções: ‘Abrir’ para abrir um arquivo que já tenha sido salvo anteriormente; ‘Salvar’, para salvar um arquivo de dados; ‘Sair’, para encerrar o programa e ‘Novo’, para criar um novo arquivo.

Figura 66 – Menu Arquivo do PivoRFadministrador

O submenu ‘Abrir’ é idêntico ao do PivoRFusuario e o ‘Salvar’ é muito parecido. É a mesma caixa de diálogo que se abre em qualquer programa do Windows, quando selecionada a opção ‘Salvar como’. A diferença é que neste programa a caixa de diálogos é direcionada para o diretório C:\PivoRF\ArquivosPivoRF (Figura 67).

Figura 67 – Tela da caixa de diálogo do submenu salvar

Nesta versão do administrador não é obrigatório o salvamento do arquivo no diretório citado, podendo se salvá-lo diretamente em um disquete, CD, etc. Entretanto, a caixa de diálogo foi programada para mostrar o referido diretório porque no PivoRFusuario é indispensável que o arquivo esteja neste local.

No menu ‘Configurações’ existe a opção apenas de escolher entre solo homogêneo e heterogêneo.

2.8.6.3 PivoRFmonitoramento

Na Figura 68 é mostrada a tela do PivoRFmonitoramento, onde pode-se observar a presença de duas caixas para entrada de dados, as quais são utilizadas para a definição do código que liga e que desliga um circuito de monitoramento via rádio frequência. Verifica-se o nome de cada uma delas logo abaixo das mesmas. Quando o programa está em execução são mostrados, na tabela: a hora da leitura, o tempo que foi gasto para se fazer a leitura dos 5 canais do A/D, o número de repetições da rotina de filtragem dos dados (Loop A/D) e o valor lido de cada canal, em Count. Nesta tela se encontram três botões, sendo o botão ‘Começar’ utilizado para iniciar o monitoramento. Para encerrar o monitoramento deve-se clicar no botão ‘Sair’, que também fecha o programa. O botão ‘Criar novo arquivo ‘DadosTrans’ deve ser utilizado no caso do usuário querer apagar os dados salvos no arquivo e reiniciar uma nova sequência de dados.

Hora	Tempo de leitura	Loop A/D	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5

Figura 68 – Tela do aplicativo PivoRFmonitoramento

2.8.7 Aplicativos para o Basic Step

Os programas desenvolvidos para os modelos do microcontrolador Basic Step, utilizados neste projeto, apresentaram funcionamento adequado. Não foram detectadas falhas na execução indicando que este microcontrolador é confiável para aplicação. Em projetos maiores, ou em outras aplicações, os inconvenientes podem surgir devido à baixa capacidade de memória para armazenamento das rotinas, o reduzido número de pinos para entrada e saída de dados, a resolução do conversor analógico/digital bem como o seu limitado número de canais A/D.

Na Figura 69 é mostrada a variação da leitura de dois canais do A/D de 1250 testes que foram realizados. Os dados foram obtidos pelo PivoRFmonitoramento e são referentes à leitura de dois tensiômetros instrumentados com o transdutor de pressão MPX5100DP.

Figura 69 – Variação da leitura de dois canais do A/D, canal 1 (a) e canal 2 (b)

Observa-se pela Figura 69 que, tanto as leituras do canal 1, quanto do canal 2, variaram muito pouco. O coeficiente de variação (CV) calculado foi de 0,043% e 0,024% para os canais 1 e 2, respectivamente, indicando que praticamente não houve variação da leitura. Estes resultados confirmam a confiabilidade do microcontrolador Basic Step e do aplicativo desenvolvido para esta função. Nesta Figura, cada ponto representa a média de 5 leituras de cada canal acrescido da constante para separação de cada A/D.

2.8.8 Duração das baterias

As baterias utilizadas no testes foram capazes de manter o circuito auxiliar e de monitoramento funcionando continuamente durante 10 horas de 25 minutos (1250 testes com duração de 30 segundos).

O tempo médio gasto para a leitura dos tensiômetros foi de 9,24 segundos. Portanto o circuito de monitoramento ficou ligado 9,24 segundos e desligado 20,76 segundos. A corrente dos dois circuitos foi de 6 mA para o circuito auxiliar e 69 mA para o circuito de monitoramento.

A capacidade de fornecimento de carga calculada foi de 264,625 mA hora⁻¹. Considerando somente o circuito auxiliar ligado, as baterias são capazes de alimentá-lo por 44 horas. Por este resultado verifica-se a necessidade de utilização de um sistema de placas fotovoltaicas com fornecimento de 75 mA para a alimentação dos circuitos: auxiliar e monitoramento.

2.8.9 Comprimento dos cabos

Nos testes feitos, não foi detectada influência do comprimento do cabo na leitura do A/D (Figura 70). Verificou-se variação de apenas 1 mV nas medidas feitas. É provável que esta variação tenha sido provocada pelo erro de medida do multímetro e não pela variação do comprimento do cabo. Este resultado mostra que se pode utilizar cabos de até 14,2 metros para a ligação dos transdutores aos canais do A/D.

Figura 70 – Variação da diferença de potencial medida na entrada do A/D, em função do comprimento do cabo

3 CONCLUSÕES

- * Os “hardwares” desenvolvidos apresentaram funcionamento adequado para o que foram propostos;
- * Os “softwares” desenvolvidos se mostraram úteis e eficientes para a aquisição de dados e controle da irrigação de precisão em pivô central;
- * A comunicação, sem fio, do computador com os tensiômetros, via rádio frequência, foi satisfatória. Entretanto, o alcance dos módulos de rádio frequência precisa ser aumentado para aplicação.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, L.G.H.; RIGHES, A.A. Estruturas automáticas para controle de água nos canais em lavoura de arroz irrigado. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.272-281, 2005.
- ANGELOTTI NETTO, A.; FERNANDES E.J. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.8, p.797-802, 2005.
- ANGNES, D.L. **Introdução ao microcontrolador BASIC STEP**. 2003. 45p. Disponível em: <<http://www.tato.ind.br/download.htm>>. Acesso em: 16 mar. 2006.
- ARRUDA, F.B.; ZULLO JR, J.; OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.1, p.11-15, 1987.
- ASSIS JUNIOR, R.N. **Análise de desempenho do tensiômetro de câmara de ar na avaliação do potencial mátrico da água**. 1995. 75p. (Doutorado em Solos e Nutrição Mineral de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- AZEVEDO, E.B. **Viabilidade do uso do inversor de frequência em sistema de irrigação do tipo pivô central**. 2003. 75p. (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- BELTRÃO, N.E.M. **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: EMBRAPA, 1999. v.2 p.507-1023.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MÜLLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.9, p.831-839, set. 2004.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 4. ed. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1995. 657p.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.
- BIANCHINI, A.; MAIA, J.C.S.; MAGALHÃES, P.S.G.; CAPPELI, N. ; UMEZU, C.K. Pentetrografo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.332-336, 2002.
- BRASIL, R.P.C.; CASARINI, E.; FOLEGATTI, M.V.; VASQUEZ, M.A.N. Avaliação de vacuômetros de Bourdon utilizados em tensiômetros no manejo da irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiania. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

CALBO A.G.; SILVA W.L.C. Novo tensiômetro - Rápido, contínuo e opera em tensões superiores a 100 kPa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiania. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

CAMARGO, A.P.; CROHMAN, F.; CAMARGO, M.B.P. Tensiômetro simples de leitura direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.17, n.12, p.1736-1772, 1982.

CANSADO, J.C.A. **Instrumentos inteligentes aplicados a automação agrícola**: Temperatura. São Paulo, 2000. 30p.

CARVALHO L.G.; SAMPAIO, S.C.; SILVA M.A. Determinação da umidade na capacidade de campo "In situ" de um Latossolo Roxo Distrófico. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.7, p.1-97, dez. 1996.

CARVALHO, D.F.; SILVA, W.A.; MEDICI, L.O.; PEREIRA, M.G. Avaliação de um sistema automático de baixo custo para manejo da irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. 1 CD-ROM.

CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. **ITEM – Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, n.54, p.46-55, mar. 2002.

CONCEIÇÃO, F.C. **Controle automático de temperatura de aquecedor de água**. Lavras: UFLA, 2002. 51p.

DELICATO, F.; PIRES, P.F.; LAGES, A.; REZENDE, J.F.; PIRMEZ, L. Middleware orientado a serviços para redes de sensores sem fio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES, 22., 2004. Gramado. **Anais...** Gramado 2004. p.75-86.

EINSFELDT, G.J.; WISINTAINER, M. Automação da coleta de níveis fluviais. In: SEMINCO 2002. SEMINÁRIO DE COMPUTAÇÃO, 11., **Anais...** Blumenau: FURB, 2002. p.269-281.

FARIA, M.A.; VIEIRA, J. Irrigação por aspersão: sistemas mais usados no Brasil. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.139, p.27-39, jul. 1986.

FARIA, R.T.; COSTA, C.S. da. **Tensiômetro**: construção, instalação e utilização; um aparelho simples para se determinar quando irrigar. Londrina: IAPAR, 1987. p. 24. (IAPAR. Circular Técnica, 56).

FAVETTA, G.M. **Estudo econômico do sistema de adução em equipamentos de irrigação do tipo pivô central**. 1998. 110p. Tese (Doutorado em Irrigação) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

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

FIGUEREDO, S.F.; FRIZZONE, J.A.; POZZEBON, E.J.; AZEVEDO, J.A.; GUERRA, A.F. Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão da água no solo para a cultura do feijoeiro. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.9, n.1, p.35-49, 1998.

GARCIA, R.F.; QUEIROZ, D.M.; MIYAGAKI, O.H.; PINTO, F.A.D. Programa computacional para aquisição de dados para avaliação de máquinas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.375-381, 2003.

GARZELLA, T.C.; BOTREL, T.A. Automação da leitura de um medidor de umidade tipo speedy com o uso de um computador e utilização em programa de manejo da irrigação. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA Da USP; REUNIÃO PAULISTA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS; CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA ESALQ, 2004. Piracicaba. **Anais...** São Paulo: USP, 2004. p.558.

GERVÁSIO, E.S.; FRIZZONE, J.A.; AMARAL, F.R.; OLIVEIRA, A.S. Sistema de irrigação automatizado para experimentação em viveiros de mudas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

GERVÁSIO, E.S.; VILELA, L.A.A.; BOTREL, T.A.; FRIZZONE, J.A.; AMARAL, J.R. Controlador de irrigação via PC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. 1 CD-ROM.

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

HECK, A.F. A soil Hygrometer for irrigated cane lands of Hawaii. **Journal of the American Society of Agronomy**, Washington, v.26, p.274-278, 1934.

HENDRICKX, J.M.H.; NIEBER, J.L.; SICCANNA, P.D. Effect of tensiometer cup size on field soil water tension variability. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.58, n.2, p.309-315, 1994.

HUBBELL, J.M.; SISSON, J. B. Advanced tensiometer for shallow or deep soil water potential measurements. **Soil Science Society American Journal**, Washington, v.163, n.4, p.271-277. Apr. 1998.

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

JUNQUEIRA, A.M.R.; OLIVEIRA, C.A.S.; VALADÃO, L.T. Fabricação "caseira" de tensiômetros de boa qualidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: SBEA, 1998, v.1. p.253-255.

LEIB, B.G.; MATTEWS, G.; KROEGER, M. **Monitoring irrigation system "on-time" with micro-loggers** St. Joseph: ASAE, 1999. 1v. (Paper n. PNW99101).

LONGO, L.A. **Uniformidade de distribuição e eficiência, em potencial, de aplicação de água de um pivô central, equipado com tubos de subida**. 1991. 63p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

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

MANTOVANI, E.C.; QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P. Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão. In: SILVA, F. M. (Ed.). **Mecanização e agricultura de precisão**. Poços de Caldas: SBEA, 1998. p.109-157.

MAROUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C. Frequência de irrigação por gotejamento durante o estágio vegetativo do tomateiro para processamento industrial. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.7, p.661-666, 2005.

MARTHALER, H.P.; VOGELSANGER, W.; RICHARD, F.; WIERENGA, P.J. A pressure transducer for field tensiometers. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.47, n.4, p.624-627, 1983.

MEDICI, L.O. Acionador automático de sistemas de irrigação. **Revista da Propriedade Industrial**, Rio de Janeiro, n.1399, 1997,

MESSIAS, A.R. **LptWireless – Controlando 8 dispositivos vai RF (RR3 e RT4)**. Disponível em: <<http://rogercom.com/pparalela/LptWireless.htm>>. Acesso em 3 jun. 2005.

MIRANDA, J.H.; GONÇALVES, A.C.; CARVALHO, D.F. Água e Solo. In: MIRANDA, J.H; PIRES, R.C.M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2001., p.1-62.

NUMAJIRI, D.A. **Desenvolvimento de um sistema de controle de dispositivos via acesso remoto**. Lavras: UFLA, 2003. 86p.

NYHAN, J.W.; DRENNON, B.J. Tensiometer data acquisition system for hydrologic studies requiring high temporal resolution. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.54, n.1, p.293-296, 1990.

OLITTA, A.F. Construção de tensiômetros para controle da irrigação. **O Solo**, Piracicaba, v.68, n.2, p.16-20, 1976.

PACHECO, F.B.P.; REICHARDT, K.; TUON, R.L.; BACCHI, O.O.S.; VILLAGRA, M.M. Variabilidade espacial e temporal do potencial mátrico da água em terra Roxa Estruturada. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.51, n.2, p.321-326, 1994.

PAVANI, L.C.; LOPES, A.S.; ZANINI, R.R.; CORÁ, J.E.; GALBEIRO, R.B. Manejo da irrigação (tensiometria e balanço hídrico simplificado) na cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, em plantio direto e convencional: primeiro ano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiania. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

QUEIROZ, T.M. **Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação na cultura do Feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2004. 120p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

QUEIROZ, T.M.; GIACOMIN, J.C.; RABELO, G.F.; BRAGA JUNIOR, R.A. Circuito eletrônico para controle automático, em malha fechada, de sistemas de irrigação, através de tensiômetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002. 1 CD-ROM.

QUEIROZ, T.M.; CARVALHO, J.A.; RABELO, G.F.; ANDRANDE, M.J.B. Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação do feijoeiro em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p. 632-641, 2005.

REBELLO JUNIOR, C.J. **Sistema de aquisição de dados agrometeorológicos baseado no microcontrolador “Basic Step”**. Lavras: UFLA, 2004. 53p. (Monografia).

REICHARDT, K. **Processos de transferencia no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. 3. ed. Piracicaba: CENA, 1975. 286p.

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo, Mac Grow-Hill, 1978. 119p.
REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n. 2, p. 211-216, maio/ago. 1988.

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

ROCHA, O.C.; GUERRA, A.F.; AZEVEDO, H.M. Ajuste do modelo de Chistiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.263-268, 2003.

RODELA, A.A., **LQI-800 Métodos instrumentais de análise**: texto auxiliar para aulas teóricas, 2003. Disponível em: http://members.tripod.com/quimica_esalq/textunic.doc. Acesso em: 20 out. 2003.

RODRIGUES, L.N. **Modelo para dimensionamento e avaliação de sistemas de irrigação por pivô central**. 1999. 145p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

ROEL, J.O.; KUO-PENG, P.; SADOWDKI, N.; BATISTELA, N.J.; BASTOS, J.P.A. Acoplamento de conversores estáticos com malha de controle e dispositivos eletromagnéticos não-lineares. **Revista Controle & Automação**, Florianópolis, v.13, n.1, p.77-83, 2002.

RUEDA, T.C. **Controle automático do nível de poeira baseado em microcontrolador**. Lavras: UFLA, 2005. 42 p.

SAAD, A. M. **Uso do tensiômetro no controle da irrigação por pivô central em cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1991. 144p. Dissertação (Mestrado em Irrigação) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

SAAD A.M.; LIBARDI P.L. Aferição do controle da irrigação feito pelos agricultores utilizando tensiômetros de faixas. In: ENCONTRO NACIONAL DE PRODUTORES IRRIGANTES, 5., 1994. São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPT, 1992^a, p.27.

SAAD, A.M.; LIBARDI, P.L. Uso prático do tensiômetro pelo agricultor irrigante. In: ENCONTRO NACIONAL DE PRODUTORES IRRIGANTES, 4., 1992, Guaíra. (Publicação IPT, 2002), 1992^b, p.1-27.

SCHUCH, L.; RECH, C. PINHEIRO, J.R. Estágio de entrada de uma UPS on-line de alta eficiência controlado por um único DSP. **Revista Controle & Automação**, Florianópolis, v.16, n.2, p.211-220, 2005.

SILVA, T.J.A.; MACHADO, C.C.; BOMFIN, E.M.S.; COELHO, R.D. Manejo da irrigação com lisímetro poroso e tensiômetro na produção de melão rendilhado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003. Goiania. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

SOUSA, V.F.; FOLEGATTI, M.V.; FRIZZONE, J.A.; CORRÊA, R.A.L.; ELOI, W.M. Produtividade do maracujazeiro amarelo sob diferentes níveis de irrigação e doses de potássio via fertirrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.4, p.497-504, 2003.

STEIDLE NETO, A. J.; ZOLNIER, S. Avaliação de circuito eletrônico para medição de temperatura em instalações agrícolas por meio da porta paralela de um computador. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.2, p.335-343, mai/ago. 2006.

TEIXEIRA, C.F.A.; MORAES, S.O.; DAMÉ, R.C.F.; SIMONETE, M.A. Utilização de sistemas de proteção em equipamento para monitoramento automático da água no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

TEIXEIRA, S.A.; COELHO, S.L. Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.367-376, maio/ago. 2005.

THIEL, T.J.; FOUSS, F.L.; LEECH, A.P. Electrical water pressure transducers for field and laboratory use. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.27, n.5, p.601-602, 1963.

TOMAZELA, C. **Desempenho hidráulico de um pivô central de baixa pressão em terreno com topografia variável**. 1991. 58p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, Baltimore, n.68, p.75-94, 1949.

VILELA, C.B. **Curso básico de eletrônica**. 4.ed. São Paulo: Editora Saber, 2001. p.65-79.

VILELA, E.D.D. Acesso à porta paralela do PC. **Revista Saber Eletrônica**, São Paulo, n.319, p.42-43, 1999.

VILELA, L.A.A. **Metodologia para dimensionamento de um sistema de pulverização acoplável a pivô central**. 2002. 127p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

VILELA, L.A.A.; CARVALHO, H.P.; PRADO, G.; BOTREL, T.A. Construção e calibração de um manômetro digital microprocessado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003. Goiânia. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; MORAES, S.O. Direct reading “air-pocket” tensiometer. **Soil Technology**, Crenlingen, v.2, p.403-407, 1989.

VILLA NOVA, M.S.; VILLA NOVA, N.A.; OLIVEIRA, A.S.; REICHARDT, K. Performance and test of a direct reading “air-pocket” tensiometer. **Short Communication**, Cremlinger, v.5, p.283-287, 1992.

VILLAGRA, M.M.; MATSUMOTO, O.M.; BACCHI, O.O.S.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L. REICHARDT, K. Tensiometria e variabilidade espacial em terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p.205-210, 1988.

XAVIER A.C.; COELHO, R.D.; LOURENÇO, L.F.; MACHADO, R.E. Manejo da irrigação em pastagem irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.2/3, p.233-239, 2004.

ZEREZUELA. R.; OKI, N. Desenvolvimento de um sistema de transmissão de dados e de software para aquisição de dados de estações meteorológicas em tempo real. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003. Goiânia - GO. **Anais...** Goiania: SBEA, 2003. CD-ROM.

ANEXOS

Anexo A – Programas desenvolvidos para o microcontrolador Basic Step

Programa para ler a posição do pivô e enviar para o computador via cabo serial (RS232)

Loop:

b0=pins

b1=0

If b0 > 0 Then Envia

Pause 50

GoTo Loop

Envia:

Serout 7,N2400,("*",#b0,"#")

b1=b1+1

If b1=10 Then Loop

GotoEnvia

Programa para ler os A/Ds e enviar o valor lido (Count) para o computador via radiofrequência

```

W0=0
W1=0
W2=0
W3=0
W6=0
LeAD:
Write 0,W6
Pause 1
Write 0,W6
Pause 1
Debug W0
W1=W1+W0 'Soma de AD
W2=W2+1 'Contador
If W2=5 Then Media
GoTo LeAD

```

```

Media:
W1=W1/5
If W6=0 Then Inc0
If W6=1 Then Inc1
If W6=2 Then Inc2
If W6=3 Then Inc3
If W6=4 Then Inc4
GoTo Media

```

```

Inc0:
W1=W1+1500
W6=W6+1
GoTo Envia

```

```

Inc1:
W1=W1+3000
W6=W6+1
GoTo Envia

```

```

Inc2:
W1=W1+4500
W6=W6+1
GoTo Envia

```

Inc3:

W1=W1+6000

W6=W6+1

GoTo Envia

Inc4:

W1=W1+7500

W6=0

GoTo Envia

Envia:

Serout 2,N2400,("*",#W1,"#")

W3=W3+1

If W3=3 Then Zera

GoTo Envia

Zera:

W0=0

W1=0

W2=0

W3=0

Goto LeAD

Programa para controlar o percentímetro do pivô em função da lâmina a ser aplicada

dirs=%00000011

W0=500

W1=100

W2=0

W3=0

LigaTorre:

W3=0

Alto 0

Alto 1

Pause 100

If W2=W0 Then DesligaTorre

If Pin6 = 1 Then Recebe

W2=W2+1

Goto LigaTorre

DesligaTorre:

W2=0

Baixo 0

Baixo 1

Pause 100

If W3=W1 Then LigaTorre

If Pin6 = 1 Then Recebe

W3=W3+1

GoTo DesligaTorre

Recebe:

Serin 7,N2400,("A"),#W0

Pause 10

W0=W0

W1=60-W0

GoTo LigaTorre

Anexo B – Variação da umidade, em função do tempo, para os 6 solos utilizados na simulação do funcionamento do sistema PivoRF

Figura 1B – Variação da umidade, em duas camadas do solo, nos seis setores de irrigação simulados, durante o período experimental

Anexo D – Telas do Windows Explorer e da Área de trabalho

Figura 1D – Tela do Windows Explorer, onde é mostrada pasta de arquivos do “software” PivoRF

Figura 2D – Opções de apresentação dos ícones dos aplicativos disponíveis da barra de tarefas do menu iniciar e atalhos na área de trabalho

Anexo E – Figuras ilustrativas dos experimentos

Figura 1E – Laboratório de testes em Piracicaba,SP (a), Laboratório de testes em Barra do Bugres, MT (b), testes iniciais da “interface” PivoRF (c ; d) e testes de transmissão via rádio frequência (e ; f)

Figura 2E - Detalhe de um placa de circuito impresso (a), vista superior (b) e inferior (c) do circuito de recepção, decodificação do endereço e acionamento via controle remoto, vista superior (d) e inferior (e) do circuito de monitoramento e transmissão das leituras dos canais do A/D

a

b

c

d

e

Figura 3E - Vista lateral de parte da primeira versão da “interface” PivoRF (a) , vistas da última versão da “interface” PivoRF (c , d), circuito de monitoramento acondicionado em caixas individuais na sua versão final, desligado (d) e ligado (e)

Figura 4E - Bancada de testes dos 6 circuitos de monitoramento construídos (a), desenvolvimento do identificador de posição (b), detalhe do conjunto de monitoramento (c), bancada de testes do identificador de posição e acionamento por controle remoto (d), detalhe da instalação dos tensiômetros (e), detalhe da ligação dos transdutores do circuito de monitoramento (f) e aparência final do experimento (g)

Figura 5E – Vista lateral e corte AB da sugestão de montagem das hastes com os sensores e imã para identificação da posição do pivô central