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

Desenvolvimento de um controlador de irrigação para áreas experimentais

Antonio Pires de Camargo

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

**Piracicaba
2012**

Antonio Pires de Camargo
Engenheiro Agrônomo

Desenvolvimento de um controlador de irrigação para áreas experimentais

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2012

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

Camargo, Antonio Pires de

Desenvolvimento de um controlador de irrigação para áreas experimentais / Antonio Pires de Camargo.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.
110 p: il.

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

1. Automação 2. Irrigação 3. Microcontrolador I. Título

CDD 631.7
C172d

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

DEDICATÓRIA

A meus pais, Hélio e Shirley. Para eles não há palavras que representem minha gratidão e amor. A eles agradeço pela vida, pelos ensinamentos, pela educação, pelos princípios, pela confiança e pelo caráter que hoje tenho. A eles dedico e dedicarei todos os meus esforços e realizações.

A minha namorada, Camila, que sempre esteve ao meu lado durante este desafio, agradeço pelo amor, apoio e principalmente pela compreensão. Dedico esta conquista e espero dedicar muitas outras ao longo de nossas vidas.

A minha avó, Celita, dedico esta conquista e agradeço pelo carinho, atenção, compreensão e incentivo em todos os momentos.

Dedico e ofereço a minha irmã, Meyrielle, como um grande incentivo a seguir em frente sempre com dedicação, empenho e humildade.

Ao Prof. Tarlei dedico este trabalho assim como dedico a minha família. A ele tenho grande admiração pela humildade, caráter e sabedoria.

AGRADECIMENTOS

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pela oportunidade e estrutura disponibilizada para a realização do doutorado.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCT-EI) pelo apoio a pesquisa, e também, pelo excelente emprego concedido, no qual venho exercendo atividades com grande honra e satisfação.

Ao Prof. Tarlei Arriel Botrel agradeço pela orientação desde o período de realização de estágio. Sou muito grato pelas várias horas que dedicou para contribuir com a minha formação, assim como pela preocupação demonstrada com meu bem estar durante todo o período.

Ao Prof. José Antônio Frizzzone agradeço pela confiança em mim depositada, pelos ensinamentos, recomendações e oportunidades concedidas durante o período de doutorado.

A Ricardo G. Vieira sou especialmente grato por ter construído uma amizade única e duradoura iniciada ainda em nossa infância. A este amigo agradeço pela excelente companhia em bons e maus momentos. Agradeço pelos conhecimentos compartilhados de programação e eletrônica e pela disposição em ajudar e contribuir para a realização de diversos trabalhos.

A Marinaldo Ferreira Pinto e Osvaldo Rettore Neto, colegas de trabalho e amigos, agradeço pela contribuição e pelas sugestões realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A Daniel Mateus Garcia pela companhia e amizade duradoura que construímos, a partir do início da nossa graduação. Agradeço pelas lembranças e experiências compartilhadas.

Ao Prof. Rubens Duarte Coelho, pelas conversas e contribuições efetuadas durante a pesquisa.

A Áureo Santana de Oliveira e Juarez Renó do Amaral, pela ajuda e contribuição nos assuntos relacionados à eletrônica.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP pelo conhecimento transmitido.

A Universidade do Estado de Santa Catarina pela formação, em especial ao Prof. Olívio José Soccol e ao Prof. Mário Nestor Ullmann pelos conhecimentos transmitidos e pela

confiança depositada ao conduzirem-me a uma excelente oportunidade de estágio, que resultou no meu atual emprego e na conquista desta etapa.

A todos os professores do ensino fundamental e médio, pela formação sólida, pelos conhecimentos iniciais transmitidos e por me guiarem durante vários anos.

E, a todos aqueles que me acompanharam e contribuíram para a conclusão desta etapa.

“Nenhum vapor ou gás consegue mover alguma coisa até estar confinado. Nenhuma queda d’água se transforma em luz e energia até ser canalizada. E nenhuma vida cresce até estar concentrada, dedicada e disciplinada.”

(Harry Emerson Fosdick)

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Estimativa do consumo de água pela plantas	25
2.2 Automação de sistemas de irrigação.....	29
2.3 Transmissão de dados em redes industriais.....	35
3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PARA CONTROLE DA IRRIGAÇÃO	39
3.1 Generalidades	39
3.2 Etapa 1.....	39
3.2.1 Caracterização do problema.....	39
3.2.2 Solução proposta.....	41
3.3 Etapa 2.....	48
3.3.1 Caracterização do problema e generalidades.....	48
3.3.2 Módulos para aquisição de dados (MAD)	49
3.3.3 Módulos para controle de atuadores – Protótipo 2 (MCA-II)	52
3.3.4 Padrão e protocolo de comunicação entre módulos e computador	53
3.3.5 Aplicativo supervisorio	55
3.3.5.1 Modos de manejo da irrigação implementados no aplicativo supervisorio	57
3.3.5.2 Estrutura do banco de dados.....	61
3.3.5.3 Interface com o banco de dados	63
3.3.5.4 Interface de configurações	64
3.3.5.5 Interface de controle	65
3.3.5.6 Interface “Log de eventos”.....	67
3.3.6 Demonstração a campo dos módulos para controle de atuadores e aquisição de dados ..	68
4 DESEMPENHO DO SISTEMA DESENVOLVIDO	71
4.1 Etapa 1.....	71
4.1.1 Observações realizadas nas áreas experimentais	71
4.1.2 Custos com material para montagem e instalação	76

4.1.3	Limitações detectadas e oportunidades de melhoria	79
4.1.4	Falhas acidentais	80
4.2	Etapa 2.....	80
4.2.1	Comparação do sistema desenvolvido com trabalhos similares	80
4.2.2	Custos com material	82
4.2.3	Calibração dos transdutores de pressão e das células de carga.....	83
4.2.4	Dados de operação na área experimental.....	84
4.2.4.1	Efeitos da temperatura nas leituras dos tensiômetros	84
4.2.4.2	Avaliação do sistema operando com o modo automático desativado	87
4.2.4.3	Avaliação do sistema operando com o modo automático ativado.....	93
4.2.4.4	Modificações de hardware e software a serem analisadas antes da elaboração de versões futuras do MAD e o do MCA	102
5	CONCLUSÃO	105
	REFERÊNCIAS.....	107

RESUMO

Desenvolvimento de um controlador de irrigação para áreas experimentais

Em áreas experimentais, é comum ser necessário individualizar a quantidade de água aplicada em cada unidade (vaso ou canteiro), podendo haver variações desta quantidade ao longo dos eventos de irrigação. Este controle individualizado constitui uma tarefa repetitiva e trabalhosa que geralmente é efetuada manualmente por meio de válvulas instaladas na entrada de cada unidade. A execução manual de tais tarefas está sujeita a erros como imperfeições no controle de tempos de operação, limitações de dimensões e critérios relacionados à pesquisa e, principalmente, implicam em desperdício de tempo e recursos para o pesquisador. Por outro lado, as soluções comercializadas para automação do controle da irrigação apresentam-se em dois extremos. As soluções com preço acessível não são versáteis o suficiente para atender aos requisitos de experimentos envolvendo irrigação, e quando empregadas implicam em uma série de restrições para a definição de tratamentos na pesquisa. Já as soluções sofisticadas, que seriam aptas para uso nas mais diversas situações, apresentam custo restritivo. Acerca disto, esta pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema constituído de módulos microprocessados e aplicativo supervisorio, empregados para o controle automático e individualizado da irrigação em unidades existentes em áreas experimentais. A solução proposta foi desenvolvida em duas etapas. A primeira etapa visou o desenvolvimento de um sistema de controle malha aberta, dedicado ao acionamento individualizado de atuadores (válvulas solenóides e motobombas), sendo operado segundo intervalos de tempo informados pelo usuário. A segunda etapa visou o desenvolvimento de um sistema automatizado para monitoramento e controle individualizado da irrigação em áreas experimentais. O sistema proposto dispõe de recursos de hardware e software que asseguram versatilidade, escalabilidade e confiabilidade, sendo capaz de atender aos requerimentos de diferentes tarefas ou experimentos.

Palavras-chave: Instrumentação; Microcontrolador; Automação

ABSTRACT

Development of an irrigation controller for experimental areas

Irrigation scheduling at experimental areas is determined by several factors, which are mainly related to features of each unit (container or bed) and criteria set by researchers. Many times the experimental areas are greenhouses and depending on the research may be necessary provide mechanisms for monitoring sensors and controlling actuators on each unit in order to supply individual water requirements. Once irrigation requirements vary in time and among units, this individual irrigation management becomes a repetitive and laborious task when sensors and actuators are operated manually. Commercial systems for automated irrigation controlling in Brazil can be characterized in two extremes, when applied on experimental areas. Irrigation controllers sold at affordable and feasible prices have basic functionalities and don't have enough versatility for using at most of irrigation researches. In the other hand, there are some sophisticated solutions for automating irrigation systems which have plenty of technology and could be implemented at any experimental area. Although, these kind of automated systems are very expensive and most of times are unfeasible for using at irrigation researches. Based on the summarized situation, this thesis presents the development of an automated system comprised of microprocessed modules and Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), implemented for actuators controlling and sensor's data acquisition at irrigation experimental areas. The first research's stage describes the development of an open-loop control system that was a dedicated solution for actuators controlling. The second stage described a closed-loop control system designed for irrigation controlling at experimental areas. The developed solutions have features of hardware and software that ensure versatility, scalability, and reliability.

Keywords: Instrumentation; Microcontroller; Automation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resultados obtidos por Misra, Padhi e Payero (2011) avaliando o uso de mini-lisímetros para determinação da evapotranspiração de trigo cultivado em vasos e em ambiente protegido. A) Dias após plantio (DAP) x Evapotranspiração diária (ET) para quatro os 4 tratamentos descritos; B) Comparação entre a determinação da evapotranspiração obtida pelos mini-lisímetros com aquelas obtidas pelo método gravimétrico, sendo que a linha sólida representa a relação 1:1	28
Figura 2 - Mini-lisímetros de pesagem suspensos em células de carga, desenvolvidos por Beeson Jr. (2011) para uso em ambiente protegido ou irrigação de plantas ornamentais	29
Figura 3 - Áreas experimentais 1 e 2	41
Figura 4 - Área experimental 3	41
Figura 5 - Esquema elétrico do MCA-I com detalhes dos componentes utilizados para o acionamento de um atuador.....	43
Figura 6 - Visão geral do SMS: (a) cabo de conexão com o SMA, (b) interruptor tipo alavanca com 3 posições, (c) led indicador de estado e resistor limitador de corrente, (d) cabo de conexão com o SMP, (e) alimentação de 12 Vcc	44
Figura 7 - Visão geral do SMA: (a) alimentação dos atuadores, (b) relê, (c) conexão com o SMS, (d) cabo de conexão com os atuadores, (e) alimentação 12 Vcc	44
Figura 8 - Visão geral do SMP: (a) cabo de conexão com o SMS 1, (b) ULN2803, (c) microcontrolador PIC16F877, (d) cabo de conexão com o SMS 2, (e) alimentação 12 Vcc, (f) MAX232, (g) barramento serial TTL, (h) interface serial RS-232 com o computador	46
Figura 9 - Visão geral dos controladores instalados nas áreas experimentais: A) Sistema com capacidade para acionar 60 atuadores, em que (a) fonte 12 V - 3 A, (b) minicontator e (c) disjuntor-motor; B) Sistema com capacidade para acionar 90 atuadores	46
Figura 10 - Aplicativo para controle de 90 atuadores na área experimental 3	47
Figura 11 - Estrutura do arquivo de texto reconhecido pelo aplicativo para inserção dos tempos de operação de atuadores	47
Figura 12 - Diagrama de operação do sistema para automação do monitoramento e controle da irrigação em áreas experimentais	49

Figura 13 - Diagrama de funcionamento do Módulo para Aquisição de Dados (MAD).....	50
Figura 14 - Esquema elétrico de ligação do microcontrolador com os multiplexadores analógicos.....	50
Figura 15 - Módulo para Aquisição de Dados (MAD): a) Conector para acoplamento de sensores; b) Multiplexador analógico; c) Microcontrolador; d) Conector para interligar módulos; e, e) Circuitos reguladores de tensão responsáveis pelo fornecimento de energia ao MAD e aos sensores.....	51
Figura 16 - Esquema elétrico do módulo utilizado para fornecimento de energia e amplificação de sinal proveniente de célula de carga (MAD-CC)	51
Figura 17 - Módulo utilizado entre cada célula de carga e o MAD (MAD-CC): a) Conector para o MAD; b) Conector para a célula de carga; c) Trimpot para ajuste do desvio de zero, no sinal de resposta da célula de carga; d) Circuito integrado ICL7660, fonte simétrica 5 Vcc; e) Resistor de ganho utilizado pelo amplificador de sinal; e, f) Amplificador de instrumentação INA125	52
Figura 18 - Módulo para Controle de Atuadores - Protótipo 2 (MCA-II): a) Sub-módulo de Acionamento (SMA); b) Sub-módulo de Processamento (SMP); e, c) Sub-módulo de Seleção (SMS)	53
Figura 19 – a) Esquema de comunicação entre o computador e os módulos; b) Módulo conversor RS-232/TTL	54
Figura 20 - Modelo Entidade-Relacionamento (MER) do banco de dados implementado no aplicativo supervisorio	62
Figura 21 - Interface do aplicativo supervisorio com o banco de dados ilustrando a tela para cadastro de unidades	64
Figura 22 - Interface de configurações do aplicativo supervisorio.....	65
Figura 23 - Interface de controle do aplicativo supervisorio.....	66
Figura 24 - Componentes indicadores de disponibilidade de água na unidade: a) Componente indicador de umidade do solo utilizado para as unidades que utilizam tensiômetros; b) Componente indicador de massa e evapotranspiração acumulada, carregado quando a unidade dispor de um mini-lisímetro	67
Figura 25 - Interface "Log de Eventos" ilustrando solicitações não respondidas por um MCA	67
Figura 26 - Curva de retenção de água no solo Franco Arenoso (LIMA, 2009)	69

- Figura 27 - Quadro de comando contendo o sistema para automação proposto. a) MAD; b) Bornes para acoplamento do cabeamento com sinal de resposta proveniente de transdutores de pressão conectados a tensiômetros; c) Módulos intermediários para acoplamento de mini-lisímetros de pesagem por célula de carga; d) MCA-II; e) Bornes para acoplamento de atuadores; f) Módulo para conversão de sinais RS-232/TTL; g) Fonte 12 Vcc; e, h) Dispositivos de acionamento e proteção 70
- Figura 28 - Experimento demonstrativo instalado em área experimental. Os 6 primeiros vasos a esquerda contêm tensiômetros e os 6 primeiros a direita são mini-lisímetros ... 70
- Figura 29 - Tempo de irrigação para cada uma das variedades avaliadas em solo textura arenosa durante o período de 02/09/11 a 04/05/12, considerando o suprimento total (T1: 100%) e parcial (T2: 70%) do consumo na condição de referência..... 72
- Figura 30 - Tempo de irrigação para cada uma das variedades avaliadas em solo de textura argilosa durante o período de 02/09/11 a 04/05/12, considerando o suprimento total (T1: 100%) e parcial (T2: 70%) do consumo na condição de referência..... 72
- Figura 31 - Duração das 40 primeiras irrigações realizadas nos vasos contendo as variedades V1, V10 e V20, demonstrando o quanto os tempos de irrigação variam ao longo das irrigações e entre os vasos..... 73
- Figura 32 - Tempos de operação para cada irrigação na área experimental 3, pré-estabelecidos em função de diferentes tratamentos, avaliando fator de disponibilidade de água no solo no cultivo de rosas 73
- Figura 33 - Número de irrigações realizadas na área experimental 3 74
- Figura 34 - Tempo total de operação dos atuadores na área experimental 3 74
- Figura 35 - Sistema eletrônico para controle da irrigação em cada planta (COATES et al., 2006b) 81
- Figura 36 - Equação empregada nos transdutores de pressão para conversão de sinais digitais em unidade de medida de pressão (kPa) 83
- Figura 37 - Resultados do ensaio das 6 células de carga utilizando um único circuito amplificador de sinal com ganho de aproximadamente 735 vezes 84
- Figura 38 - Dados coletados no período de 28/04/2012 a 07/05/2012, nas unidades 1, 3, 4, 5 e 6, demonstrando o efeito da temperatura na dispersão de leituras de tensão acusadas pelos tensiômetros..... 87

Figura 39 - Dados coletados entre 23/05/12 e 11/06/12, nas unidades 1 a 6, caracterizadas pelo manejo da irrigação baseado no uso de tensiômetros (modo de controle automático desativado)	89
Figura 40 - Dados coletados entre 23/05/12 e 11/06/12, nas unidades 7 a 12, caracterizadas pelo manejo da irrigação baseado no uso de mini-lisímetros (modo de controle automático desativado)	92
Figura 41 - Dados coletados entre 17/06/12 e 28/06/12, nas unidades 1 a 6, caracterizadas pelo manejo da irrigação baseado no uso de tensiômetros (modo de controle automático ativado).....	97
Figura 42 - Dados coletados entre 17/06/12 e 28/06/12, nas unidades 7 a 12, caracterizadas pelo manejo da irrigação baseado no uso de mini-lisímetros (modo de controle automático ativado).....	100
Figura 43 - Dados de massa e temperatura entre 168 e 192 horas de operação (dia 24/06), enfatizando o efeito da variação de temperatura nas leituras da célula de carga..	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formato das solicitações empregadas para comunicação entre o computador e os módulos	54
Tabela 2 - Operações e argumentos válidos para solicitações aos MCA-II.....	55
Tabela 3 - Operações e argumentos válidos para solicitações aos MAD	55
Tabela 4 - Mensagens retornadas pelo módulos quando uma solicitação é efetuada.....	55
Tabela 5 - Significado de valores disponíveis para escolha em determinados campos do banco de dados.....	64
Tabela 6 - Lista de material e custos para construção de um Módulo de controle de atuadores - MCA-I.....	77
Tabela 7 - Custos com material para implantação do sistema de controle na área experimental 3	79
Tabela 8 - Equações obtidas para a calibração individual das células de carga	84
Tabela 9 - Unidades, tipos de sensor e respectivos tratamentos.....	94

1 INTRODUÇÃO

Em áreas experimentais que envolvem o emprego da irrigação é comum a necessidade de aplicação de volumes de água em cada tratamento. Uma vez que tratamentos e repetições geralmente são individualizados em canteiros ou vasos, a irrigação em cada uma dessas unidades frequentemente é controlada por uma válvula. Muitas vezes estas válvulas são de acionamento manual, requerendo a presença de um operador durante os eventos de irrigação para manipulá-las. Dependendo da dimensão e das circunstâncias em que a pesquisa é realizada, pode ser necessário que uma ou mais pessoas dediquem muitas horas de trabalho somente para manipular atuadores (válvulas e motobombas), de acordo com as premissas do experimento. Além disso, é comum que as atividades repetitivas sejam conduzidas pelos próprios pesquisadores, ou seja, indivíduos altamente qualificados que inevitavelmente dedicam muito tempo executando tarefas repetitivas ao longo dos experimentos. Não há dúvidas que a execução destas tarefas implica em desperdício de tempo para o pesquisador, tempo este que poderia ser dedicado à realização de atividades mais nobres.

A automação tem se mostrado cada vez mais importante e necessária para a evolução do setor agrícola, agilizando e aprimorando processos, bem como reduzindo custos associados à mão de obra demandada para execução de tarefas repetitivas. Sistemas automáticos para monitoramento e controle da irrigação apresentam a potencialidade de aplicar água no momento e quantidade adequados, contribuindo para a otimização no uso desse recurso. Observa-se que as empresas que comercializam controladores de irrigação e soluções similares disponibilizam uma grande variedade de modelos. Os controladores mais simples são os mais difundidos pela facilidade de uso e baixo custo; operam em malha aberta e são capazes de atuar em poucos dispositivos, de acordo com uma programação de horários e datas previamente definidas. No outro extremo, existem sistemas para controle automático da irrigação providos de interface com computadores, transmissão de dados via rádio-frequência ou GPRS, capazes de atuar em dezenas de válvulas e outros atuadores, com base em dados adquiridos de estações meteorológicas automáticas e sensores de umidade do solo. Estes sistemas apresentam alta complexidade, sendo capazes de monitorar e reagir a alterações nas condições ambientais e falhas do sistema, alertando o usuário por meio de diferentes mecanismos.

Apesar da avançada tecnologia disponível no mercado de sistemas para automação da irrigação, algumas limitações podem ser destacadas ao se referir ao emprego destes sistemas

em pesquisas envolvendo irrigação. Primeiramente, sabe-se que praticamente todos esses sistemas são importados, fato que condiciona uma dependência brasileira às tecnologias criadas e aprimoradas em outros países. Os sistemas mais sofisticados e de interesse para pesquisa apresentam custo restritivo e requerem mão de obra especializada para operação e principalmente para manutenção. Além disso, apesar da variedade de modelos existentes é reconhecido que muitas pesquisas exigem soluções especiais de automação, devido à própria especificidade das pesquisas, de modo que os sistemas comerciais muitas vezes não são capazes de atender às necessidades das mesmas ou atendem-nas parcialmente, não solucionando o problema ou sendo ineficazes. Acerca disto a realidade demonstra que, para o uso de sistemas de automação atualmente comercializados é necessário que a pesquisa seja adaptada as funcionalidades disponíveis nos equipamentos, o que certamente constitui um fator limitante e indesejável. Não há dúvidas que empresas dedicadas ao desenvolvimento de soluções para automação de processos dominam a tecnologia necessária para automatizar tarefas em qualquer área experimental, visto que a automação de processos industriais é muitas vezes mais complexa que a automação de processos que envolvem a irrigação em áreas experimentais. Entretanto, talvez por uma questão de escala de produção e aspectos econômicos, nota-se que não há interesse em produzir sistemas específicos requeridos para a condução de experimentos envolvendo irrigação.

Uma vez caracterizado o problema existente em áreas experimentais que envolvem o uso de irrigação, bem como a demanda relacionada à automação da irrigação nestas áreas, esta pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema constituído de módulos microprocessados e aplicativo supervisor, empregados para o controle automático e individualizado da irrigação em unidades (vasos ou canteiros) existentes em áreas experimentais.

O sistema proposto deve dispor de recursos de hardware e software que assegurem versatilidade, escalabilidade e confiabilidade, de modo que os requerimentos de diferentes tarefas ou experimentos possam ser atendidos. Para que haja versatilidade e escalabilidade, deve-se garantir a possibilidade de trabalhar com um único módulo ou interligar vários módulos a fim de que os requisitos de monitoramento e/ou controle da irrigação sejam atendidos tanto em pequenas como em grandes áreas experimentais. O hardware que constitui os módulos para controle de atuadores, na medida do possível, deve permitir o acionamento de diferentes tipos de atuadores, assegurando versatilidade dos módulos. Os módulos para aquisição de dados devem dispor de recursos que permitam a aquisição de dados de células de

carga e de transdutores de pressão acoplados a tensiômetros. O aplicativo supervisorio deverá permitir o ajuste de configurações que assegurem a individualização da irrigação nas unidades que constituem a área experimental e, portanto a versatilidade do sistema.

O desempenho do sistema proposto foi avaliado através de experimentos montados em áreas experimentais. Com base nos experimentos conduzidos foi proposta uma nova tecnologia dedicada para a automação de áreas experimentais que envolvem pesquisas relacionadas à irrigação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estimativa do consumo de água pela plantas

A determinação da quantidade de água necessária para as culturas constitui um dos principais itens para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de qualquer sistema de irrigação (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Superestimar a irrigação necessária implica superdimensionamento do sistema de irrigação e/ou aplicação excessiva de água, acarretando aumento dos custos da irrigação e problemas para o ambiente e para a cultura. Por outro lado, subestimar a demanda hídrica pode restringir a produtividade da cultura e agravar problemas de salinidade de solo, implicando redução da área irrigada devido à incapacidade do sistema em suprir as exigências da cultura.

A quantidade de água consumida pelas culturas pode ser estimada com base em várias metodologias, sendo que as mais difundidas no meio agrícola são baseadas na determinação do conteúdo de água no solo de forma direta ou indireta, ou ainda, metodologias que estimam a evapotranspiração da cultura a partir de dados meteorológicos. Metodologias de manejo da irrigação com base em dados da planta, apesar de promissoras, ainda podem ser consideradas de uso restrito a áreas experimentais, provavelmente devido aos custos e a complexidade dos instrumentos e métodos para estimativa do consumo hídrico nestas condições. De qualquer modo, a irrigação deve complementar a quantidade de água consumida pela planta, que não for suprida pela precipitação ocorrida em um dado período. Em locais com problemas de salinidade do solo, deve-se prever uma lâmina de irrigação adicional para promover a lixiviação de sais do solo, evitando problemas de salinização, que prejudicaria o desenvolvimento da cultura.

Ayars e Phene (2007) afirmam que as metodologias mais antigas para manejo da irrigação são fundamentadas em atributos do solo. O método padrão para determinação direta do conteúdo de água no solo consiste em submeter uma amostra de solo úmido em uma estufa a 105 °C até que a massa da amostra torne-se constante, sendo que o conteúdo de água no solo é calculado pela razão entre massa de água e de solo seco. Entretanto, o método padrão apesar de preciso e confiável, apresenta alguns inconvenientes como a necessidade de coleta de amostras de solo a cada evento de determinação, bem como o longo período necessário para que o conteúdo de água no solo seja determinado.

Em contrapartida, existem vários métodos indiretos que permitem a determinação do conteúdo de água no solo, os quais podem fornecer resultados mais rapidamente, quando comparados ao método padrão. De acordo com Albuquerque e Durães (2008), instrumentos dotados de sensores que medem o potencial matricial da água no solo, como tensiômetros, são muito úteis para determinar indiretamente o conteúdo de água no solo, desde que a curva de retenção para o solo esteja disponível. Instrumentos dotados de sensores que medem o conteúdo de água no solo, como a sonda de nêutrons e o TDR, são mais complexos para utilização e mais caros. É importante lembrar que todos esses instrumentos de medição necessitam de calibração (TEIXEIRA; COELHO, 2005).

Para o monitoramento do potencial de água no solo, o tensiômetro é um dos instrumentos mais utilizados (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Para a maioria das culturas, o potencial crítico de água no solo não deve ser inferior a -300 kPa, sendo que os potenciais ótimos para as mesmas são maiores que -80 kPa (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2008). Com base no valor crítico ótimo para a maioria das culturas, o tensiômetro apresenta-se bastante útil no controle da irrigação, visto que pode operar até potências de -85 kPa (LIBARDI, 2005).

Recomenda-se que tensiômetros sejam instalados na zona de máxima atividade radicular da cultura, sendo que o potencial de água no solo obtido ao longo das leituras é empregado como indicativo do momento para iniciar a irrigação, quando adotado turno de rega variável. Albuquerque e Durães (2008) recomendam que tensiômetros sejam instalados em duas profundidades, sendo um instalado na zona radicular ativa cuja função já foi descrita e, o outro, instalado na extremidade inferior da zona radicular, cuja função é fornecer dados complementares que permitam obter informações sobre o movimento e redistribuição de água no solo.

Outros dispositivos que vem sendo mencionados para determinação indireta do conteúdo de água no solo são os sensores Watermark®, que apresentam uma boa relação entre custo, precisão e confiabilidade (MIRANDA et al., 2005; LEÃO et al., 2007; COATES et al., 2006a; FISHER, 2007). Os sensores Watermark® são sensores resistivos, constituídos de dois eletrodos inseridos em uma matriz porosa. A resistência elétrica do material entre os eletrodos é função do potencial de água no solo, sendo que a resistência aumenta na medida em que solo torna-se mais seco.

Conforme já foi mencionado, o consumo de água pelas culturas também pode ser estimado com base na evapotranspiração, sendo que lisímetros são os instrumentos utilizados

para determinação direta da mesma e caracterizam o método padrão para esta situação. Lisímetros geralmente são empregados para a determinação da evapotranspiração de referência e de culturas, bem como para a calibração de modelos baseados em dados meteorológicos. Dentre os tipos, destacam-se os lisímetros de pesagem por célula de carga, devido a alta exatidão e possibilidade de aquisição de dados com alta frequência. Campeche (2002) menciona que há uma infinidade de tipos e tamanhos de lisímetros de pesagem, havendo desde micro-lisímetros, com capacidade de determinação de poucos quilogramas, até lisímetros com capacidade de determinação de algumas toneladas de massa.

Grimmond, Isard e Belding (1992) mencionam várias pesquisas nas quais mini-lisímetros tem sido utilizados, apresentando as seguintes vantagens em relação a lisímetros convencionais: a) permitem a determinação da evapotranspiração em áreas pequenas; b) requerem pouca alteração no ambiente de estudo no momento da instalação; c) são consideravelmente menores e mais baratos, permitindo que várias unidades sejam instaladas na área de interesse a fim de permitir a obtenção de dados de variabilidade espacial de evapotranspiração. Os referidos autores desenvolveram e avaliaram dois mini-lisímetros de pesagem por célula de carga, com área de superfície de $0,061 \text{ m}^2$ (diâmetro de aproximadamente 28 cm). A evapotranspiração foi determinada em intervalos horários, com base na diferença entre a massa lida no início e no final de cada período. Para os autores, os instrumentos avaliados caracterizaram um modo econômico, adequado e automático para o monitoramento horário e contínuo da evapotranspiração.

Dugas e Bland (1989) compararam 3 tamanhos de lisímetros de pesagem por célula de carga empregados para monitoramento da evapotranspiração de sorgo e trigo, sendo os lisímetros caracterizados por áreas de superfície de 0,18, 0,75 e 3 m^2 . Os autores não encontraram diferenças significativas nos valores de evapotranspiração comparando os 3 tamanhos de lisímetros avaliados, entretanto relatam vários fatores que podem prejudicar as determinações de evapotranspiração na medida em que as dimensões de lisímetros são reduzidas.

Misra, Padhi e Payero (2011) descreveram aspectos de projeto e desempenho de doze mini-lisímetros empregados para o monitoramento da evapotranspiração de trigo cultivado em vasos de 20 kg de capacidade, em ambiente protegido. A massa de solo seco inserida em cada um dos vasos foi determinada na instalação do experimento; 55 dias após o plantio houve a diferenciação da irrigação nos lisímetros, sendo que 4 tratamentos foram estabelecidos; a irrigação em cada lisímetro se iniciava quando a massa atingia valores equivalentes de

conteúdo de água no solo à base de volume (θ), nas seguintes porcentagens do conteúdo de água no solo na capacidade de campo (θ_{CC}): T40 = 40% de θ_{CC} , T50 = 50% de θ_{CC} , T70 = 70% de θ_{CC} e T80 = 80% de θ_{CC} ; a umidade do solo na capacidade campo foi determinada para as condições de solo nos próprios vasos; a evapotranspiração diária em cada lisímetro foi determinada com base na diferença entre leituras de massa em intervalos de 24 h. Estes autores compararam os valores de evapotranspiração obtidos de forma direta mini-lisímetros e de forma indireta por meio da umidade determinada pelo método gravimétrico, evidenciando-se adequado desempenho dos mini-lisímetros para determinação da evapotranspiração da cultura do trigo, e portanto, concluindo-se que os erros devido ao acúmulo de biomassa podem ser considerados insignificantes para a situação (Figura 1).

Figura 1 - Resultados obtidos por Misra, Padhi e Payero (2011) avaliando o uso de mini-lisímetros para determinação da evapotranspiração de trigo cultivado em vasos e em ambiente protegido. A) Dias após plantio (DAP) x Evapotranspiração diária (ET) para quatro os 4 tratamentos descritos; B) Comparação entre a determinação da evapotranspiração obtida pelos mini-lisímetros com aquelas obtidas pelo método gravimétrico, sendo que a linha sólida representa a relação 1:1

É interessante comentar a estratégia incomum de manejo da irrigação empregada por Misra, Padhi e Payero (2011) com base nos mini-lisímetros. Sabe-se que a partir de dados de evapotranspiração, convencionalmente tratamentos são diferenciados em porcentagens da evapotranspiração considerada como referência. Por outro lado, quando o manejo da irrigação é definido com base em parâmetros de solo, estabelece-se uma umidade inferior crítica na qual a irrigação deve ser iniciada, sendo que a quantidade de água aplicada é determinada com base nos parâmetros do solo e na umidade superior desejada. Com bases nessas afirmações, observa-se que os autores estabeleceram os tratamentos com base em porcentagens do conteúdo de água no solo na capacidade de campo, ou seja, a partir das determinações de evapotranspiração, calculou-se a variação no conteúdo de água no solo para a condição de cada mini-lisímetro. Desta forma evidenciou-se a adoção de uma estratégia de manejo da irrigação equivalente aquela utilizada com base em dados de solo.

Beeson Jr. (2011) descreve os detalhes construtivos e o uso de mini-lisímetros de pesagem, cuja célula de carga foi montada acima do tanque e este foi mantido suspenso tracionado por correntes, conforme Figura 2. O autor emprega equipamentos Campbell para aquisição de dados e controle de válvulas em 16 mini-lisímetros instalados, relatando um custo total de 16455 dólares.

Figura 2 - Mini-lisímetros de pesagem suspensos em células de carga, desenvolvidos por Beeson Jr. (2011) para uso em ambiente protegido ou irrigação de plantas ornamentais

Para fins de automação do controle da irrigação em áreas experimentais, o monitoramento do consumo de água pelas plantas requer um sistema capaz de coletar dados de vários sensores, processar estes dados segundo critérios estabelecidos pelo usuário e atuar sobre dispositivos para o controle do sistema de irrigação. Tanto computador quanto microcontroladores podem ser utilizados para automação do controle da irrigação.

2.2 Automação de sistemas de irrigação

A necessidade cada vez maior de monitorar o comportamento de variáveis ambientais que sofrem alterações temporais e espaciais, de gerenciar grandes quantidades de informação e tomar decisões rápidas e precisas, vem promovendo o emprego de dispositivos eletrônicos na agricultura. Os avanços na tecnologia de sensores, microcontroladores e dispositivos de comunicação, cada vez mais eficientes e de menor custo, vêm favorecendo a evolução da agricultura.

O termo automação pode ser explicado como um conjunto de técnicas e/ou dispositivos empregados com o objetivo de facilitar, agilizar e, talvez, elevar a eficiência de

um determinado processo. De modo geral, a automação aumenta a segurança e reduz a mão de obra humana envolvida na realização de uma atividade e, quando adequadamente desenvolvida e aplicada, pode contribuir para a melhoria do mesmo. Sistemas automáticos permitem o monitoramento de processos e podem prover mecanismos para ajuste ou controle destes processos.

Os sistemas de irrigação tradicionalmente requerem mão de obra para serem operados, de modo que, falhas humanas são comuns e o controle manual eventualmente pode ser irregular. A irregularidade no controle da irrigação pode implicar na irrigação excessiva ou deficiente, sendo que a primeira acarreta desperdício de água e energia, podendo causar lixiviação de nutrientes e até mesmo a contaminação do lençol freático, além de limitar a disponibilidade de oxigênio na zona radicular da cultura. Assim como a irrigação deficitária, o excesso de água na zona radicular pode causar reduções na produtividade das culturas. O emprego de aplicativos computacionais atrelado a sistemas para automação pode reduzir o trabalho relacionado ao manejo da irrigação e, mais importante que isso, favorecer a adoção de técnicas mais precisas e eficientes, contribuindo para a otimização no uso de recursos (CASADESÚS et al., 2012).

Segundo Queiroz, Botrel e Frizzone (2008), o maior desafio para a Engenharia Agrícola, na cadeia da irrigação, será o desenvolvimento de métodos e sistemas mais eficientes na aplicação e no uso da água, de modo que, a automação desempenha um papel fundamental neste contexto. Segundo os mesmos autores, a automação desejada e implementada deve ser aquela que considera a informação de sensores no solo, na planta e/ou na atmosfera, para o controle do sistema de irrigação, ao invés de um simples calendário programável. A pesquisa tem demonstrado grande avanço no sentido de facilitar e melhorar o manejo da irrigação e tem encontrado soluções para os mais diversos problemas buscando alternativas nas áreas de eletrônica e informática, sendo que o desenvolvimento de alternativas de controle automático e de baixo custo deve ser priorizado (QUEIROZ, 2007). 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 somente em laboratórios bem equipados e centros de pesquisa (GOMIDE, 2008). 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 (VILELA, 2001).

Sistemas automáticos bem elaborados podem responder às situações de adversidade de forma inteligente, provendo monitoramento e controle do funcionamento de um processo de forma segura, rápida e eficaz. Segundo Leão et al. (2007), os controladores eletrônicos desenvolvidos são capazes de atuar em sistemas de irrigação a partir de dados enviados continuamente por sensores, sendo que um sistema automatizado de irrigação é capaz de assegurar o adequado suprimento de água às plantas ao longo do ciclo de desenvolvimento.

Observa-se, principalmente em microirrigação, a tendência de aumentar a frequência de irrigação, aplicando lâminas menores. Ayars e Phene (2007) mencionam que o controle de sistemas de irrigação que operam em alta frequência, deve ser automático e capaz de responder a pequenas e rápidas mudanças da umidade do solo, das condições hídricas da planta ou da evapotranspiração. Segundo estes autores, a automação de sistemas de irrigação é mais do que simplesmente selecionar adequadamente os componentes do sistema, pois envolve a coleta e interpretação de dados de solo, planta e atmosfera, para que se possa controlar a irrigação de acordo com objetivos previamente determinados.

Os sistemas de controle são divididos em duas categorias: a) sistemas malha aberta (*open loop systems*) e, b) sistemas malha fechada (*closed loop systems*) (AYARS; PHENE, 2007). Em sistemas de controle malha aberta a operação é pré-estabelecida e independente de qualquer sensor, sendo que eventuais mudanças ou decisões são tomadas pelo operador. Tratando-se de irrigação, as principais decisões a serem tomadas são quando e quanto irrigar. Em sistemas de controle malha fechada, o controlador é dependente de sensores ou algoritmos de controle que propiciem algum mecanismo de realimentação (*feedback*). A precisão do controle nestas circunstâncias é atingida pela comparação entre a situação em que o processo se encontra e a condição de referência, que pode ser fornecida por mecanismos de realimentação, como sensores.

Ayars e Phene (2007) afirmam que a automação de sistemas de irrigação deve ser algo realizado em estágios para que o usuário aprenda e confie no sistema. O nível inicial consiste na implantação de um sistema de controle malha aberta, no qual o operador define a frequência e a duração das irrigações. Em um segundo nível, deve-se propor um sistema de controle malha fechada usando mecanismos simples de realimentação como, por exemplo, o emprego de tensiômetros como dispositivos de referência para iniciar a irrigação, sendo esta realizada durante um período pré-definido. Em níveis mais avançados, sensores poderiam ser utilizados para determinar o início da irrigação, e ainda para detectar falhas no sistema, tornando o controle bastante independente da interferência humana.

Segundo Miranda et al. (2005), metodologias de controle da irrigação tem sido propostas ao longo dos últimos anos, mas a adoção destas tem sido limitada pelo custo, tempo requerido para instalação, manutenção e complexidade para a tomada de decisões. De acordo com os autores, uma solução potencial para estes problemas seria a automação total da irrigação, empregando sistemas de controle malha fechada.

Os mesmos autores relatam que a distribuição e organização de dispositivos de controle e sensores em uma área pode ser centralizada ou distribuída. Em sistemas de controle centralizados, os sensores e atuadores são conectados ponto-a-ponto a um controlador central, sendo que a comunicação pode ser feita por fios, rádio-frequência ou infravermelho. Segundo os autores, esta estratégia é comumente utilizada em pequenas áreas, tornando-se cara, de difícil manutenção e pouco flexível quando aplicada em áreas extensas. Também mencionam que, dependendo das distâncias entre os dispositivos e o controlador central, a comunicação utilizando rádio-frequência ou infravermelho pode ser mais barata que a conexão ponto-a-ponto utilizando fios. Por outro lado, sistemas de controle distribuídos, são constituídos por controladores autônomos instalados próximos a sensores ou atuadores na área, sendo que os controladores possuem mecanismos que provêm intercomunicação. As vantagens de sistemas de controle distribuídos são a redução de custos com fios, facilidade de instalação e manutenção (TORRE-NETO et al., 2000). Todavia esta afirmação só é verdadeira se os microcontroladores e dispositivos de transmissão de dados empregados apresentarem baixo custo.

O manejo da irrigação baseado no conteúdo de água no solo consiste em monitorar e controlar a quantidade de água aplicada a fim de que se mantenha o conteúdo de água no solo dentro de uma faixa pré-determinada pelo usuário (CASADESÚS, 2012; CARDENAS-LAILHACAR; DUKES, 2010). Em aplicações mais simples, válvulas são acionadas quando os valores indicados por sensores acusam um limite inferior de umidade do solo pré-estabelecido, sendo que a quantidade de água a ser aplicada é calculada de acordo com dados do solo e da cultura. Comercialmente, existem dispositivos modernos para monitoramento da umidade do solo que além do sensor, possuem um microcontrolador com interface para transmissão de dados para outros dispositivos eletrônicos como controladores de irrigação (CARDENAS-LAILHACAR; DUKES, 2010).

Dezenas de trabalhos envolvendo eletrônica, computação, redes de sensores e automação são disponibilizados em bases de dados WEB, sendo que alguns deles serão

brevemente apresentados na sequência, a fim de fornecer um panorama da automação em sistemas de irrigação.

Coates et al. (2006a) desenvolveram um sistema para monitoramento e controle individual de microaspersores instalados em um pomar de frutas, capaz de detectar e reagir a falhas de entupimento e rompimento de emissores ou linhas laterais. A área experimental era constituída de 50 árvores, onde cada árvore foi irrigada por um microaspersor, equipado com um sensor resistivo de umidade do solo Watermark 200SS®, uma válvula solenóide e um transdutor de pressão, acoplados a um microcontrolador. A metodologia descrita pelos autores, utilizando transdutores de pressão para detecção de falhas de entupimento e rompimento de linha lateral foi adequada, visto que o erro no diagnóstico de falhas foi de apenas 1% em 216 observações. Adotou-se o padrão RS-232 para comunicação entre os microcontroladores.

Partindo da mesma estrutura experimental apresentada em Coates et al. (2006a), Coates et al. (2006b) discutem o circuito eletrônico adotado para a automação de uma área experimental e o protocolo de comunicação serial desenvolvido para o controle da rede de microcontroladores. O autor incentiva o desenvolvimento de hardware e protocolo de comunicação próprios para situações experimentais, a fim de evitar o dispêndio de tempo e recursos necessários para compreensão e implementação de protocolos de comunicação comerciais ou industriais.

Fisher (2007) desenvolveu um circuito microprocessado simples e barato para aquisição e armazenamento de dados provenientes de sensores de umidade do solo. O mesmo afirma que o uso de equipamentos comerciais para a aquisição de dados de sensores de umidade do solo em áreas de cultivo apresenta custo proibitivo, fato que justifica o desenvolvimento de soluções alternativas para o problema. Utilizaram-se microcontroladores PIC e sensores resistivos Watermark®, que operam adequadamente. Foram avaliadas 150 unidades de aquisição de dados, instaladas em áreas de cultivo em 2004 e 2005.

Miranda (2003) desenvolveu e testou um sistema distribuído e malha fechada para controle da irrigação, sendo este de baixo custo e baixo consumo de energia. Utilizaram-se sensores de umidade do solo como base para o manejo da irrigação, tendo como componentes do sistema: microcontroladores, tensiômetros, sensores Watermark®, termistores, transdutores de pressão e válvulas solenóides. Observou-se que o sistema desenvolvido foi eficaz em manter a umidade do solo próximo dos valores pré-estabelecidos, assegurando o adequado desenvolvimento da cultura avaliada. Miranda et al. (2005) descrevem um trabalho

similar ao de Miranda (2003), em que desenvolveram e testaram um sistema automático para controle de sistemas de irrigação fixos. As unidades de controle foram constituídas por painel solar, bateria, microcontrolador, válvula solenóide tipo latch, transdutor de pressão (MPX5700), sensores de temperatura (termistor modelo C100F103G) e potencial de água no solo (Watermark modelo 200SS®). Adotou-se a estratégia de sistemas de controle distribuídos para desenvolvimento e arranjo do sistema automático na área experimental.

Fisher e Kebede (2010) desenvolveram um sistema para aquisição de dados de sensores de temperatura do ar, solo e dossel, assim como umidade do solo. Os principais componentes do sistema foram os seguintes: microcontrolador PIC; circuito RTC (Real Time Clock) externo utilizando DS1307; memória EEPROM externa com 1024kbytes de memória, suficiente para armazenamento de dados de sensores por longo período (várias semanas); sensor LM35 para determinação da temperatura do ar; sensor TC74 para determinação da temperatura do solo; sensor infravermelho MLX90614 para determinação da temperatura do dossel; e, sensor resistivo Watermark® para determinação da umidade do solo. Várias unidades do sistema desenvolvido foram instaladas em uma área de produção de milho e operaram adequadamente durante uma estação de cultivo.

Outra linha crescente de pesquisas relacionadas à automação de tarefas envolvendo irrigação, refere-se ao uso de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). Eliminar fios para transmissão de dados e comunicação entre módulos apresentam algumas vantagens, principalmente para condições de campo, onde o custo com cabeamento eleva-se na proporção em que a dimensão das áreas aumenta. Além disso, o risco de danos ao cabeamento devido a operações com máquinas e implementos agrícolas é eliminado utilizando tecnologias de comunicação sem fio. Entretanto alguns pontos críticos devem ser mencionados: a) módulos autônomos comercializados e utilizados em RSSF ainda apresentam elevado custo; b) o consumo de energia nestes módulos constitui um fator crítico, pois de modo geral, transceptores de rádio-frequência apresentam elevado consumo (VELLIDIS et al., 2008); e, c) vulnerabilidade a ação de descargas atmosféricas. Mesmo assim, as tecnologias disponíveis em RSSF vêm sendo utilizadas com sucesso em aplicações agrícolas a exemplo dos trabalhos apresentados por Hamrita e Hoffacker (2005); Evans, Kim e Iversen (2007); Morais et al. (2008); Vellidis et al. (2008); Matese et al. (2009); Riquelme et al. (2009); Kim e Evans (2009).

2.3 Transmissão de dados em redes industriais

Visando o desenvolvimento de sistemas automáticos para aquisição de dados e controle de atuadores em áreas experimentais agrícolas, faz-se necessário revisar alguns conceitos e soluções empregados em redes industriais, uma vez que a automação se apresenta bastante evoluída no setor industrial. Assim sendo, alguns conceitos pertinentes a esta pesquisa serão discutidos na sequência.

Em instrumentação e sistemas de controle, os dados são adquiridos por instrumentos de medição e transmitidos para uma unidade de processamento, que pode ser um computador ou um microcontrolador. A partir da unidade de processamento, instruções são enviadas para os dispositivos de controle, responsáveis por atuar sobre o processo. Sistemas modernos de controle concentram as atividades em uma unidade central de processamento, que coleta dados de toda a rede de instrumentos de medição, disponibilizando interfaces para monitoramento e controle de processos (MACKAY et al., 2004). Nestas condições, é comum o uso de sistemas para controle supervisão e aquisição de dados (*Supervisory Control and Data Acquisition* - SCADA) ou simplesmente aplicativos supervisórios, os quais são desenvolvidos com o objetivo de prover uma interface que permita interação entre computador e equipamentos eletrônicos utilizados no monitoramento e controle de processos.

O padrão RS-232 foi desenvolvido para permitir a comunicação entre dois dispositivos, sendo que os sinais são representados por níveis de tensão que variam de acordo com o tipo de dispositivo, havendo essencialmente: um fio para transmissão, um para recepção e outro para referência de tensão (terra). Este padrão é útil em comunicações com baixas velocidades de transmissão (20 kbps), sendo que o comprimento máximo dos cabos que interligam dispositivos não deve superar 15 m (MACKAY et al., 2004).

Os microcontroladores PIC e dsPIC fabricados pela Microchip, permitem a comunicação de dados via serial com sinais cujos níveis de tensão variam de 0 a 5 V ou de 0 a 3,3 V, dependendo da tensão de alimentação do microcontrolador. Com base nisso, para a comunicação serial entre um computador e um microcontrolador que opera com alimentação de 5 V, é necessário instalar um circuito integrado (CI) para conversão de níveis de sinal RS-232 (-15 a 15V) em TTL (0 a 5V), sendo o MAX232 um dos CIs aptos à desempenhar esta função. Park et al. (2003) descrevem várias limitações para padrões RS-232 e TTL, sendo que o uso destes não é recomendado para distâncias de transmissão superiores a 15 m; o padrão foi desenvolvido para comunicação entre 2 dispositivos; e, em ambientes industriais se

evidencia elevada suscetibilidade a interferências, fato que reduz a confiabilidade da transmissão de dados.

Na indústria, o padrão de comunicação mais utilizado é o RS-485, cujas principais vantagens em relação ao RS-232 são a robustez à ruídos e interferências, bem como a possibilidade de comunicação em distâncias de até 1200 m (MACKAY et al., 2004). A taxa de transmissão de dados para curtas distâncias (6 m) é de até 10 Mbps, decaindo a medida que aumenta-se o comprimento do cabeamento de transmissão, sendo que para 1200 m a taxa de transmissão é de 90 kbps.

O RS-485 convencionalmente permite a comunicação de até 32 dispositivos em um único barramento, sendo que este número depende do CI adotado para conversão de sinais. O padrão RS-485 opera com nível lógico TTL na entrada, sendo que o CI MAX485, responsável por realizar a interface entre sinais TTL e RS-485, permite a comunicação entre 32 dispositivos, enquanto que adotando-se os CIs MAX487 ou MAX1487 torna-se possível interligar até 128 dispositivos no mesmo barramento.

O meio físico mais utilizado para a comunicação RS-485 é o cabo tipo par trançado, sendo que através de um único par de fios, cada dispositivo pode transmitir ou receber dados. Cada dispositivo aciona o seu transmissor apenas no instante que necessita transmitir, mantendo-o desligado no resto do tempo de modo a permitir que outros dispositivos transmitam dados. Em um determinado instante de tempo, somente um dispositivo pode transmitir dados, o que caracteriza uma rede no modo de operação *half-duplex*. Apesar de pouco utilizado, uma rede RS-485 pode também utilizar 2 pares trançados, permitindo a transmissão e recepção de dados simultânea, caracterizando o modo de operação *full-duplex*. Detalhes e recomendações sobre o uso do padrão RS-485 podem ser consultados em Park et al. (2003), Mackay et al. (2004) e Kron Medidores (2011).

O padrão RS-485 apenas especifica características elétricas e modos de operação da rede, não definindo como os dados serão transmitidos e recebidos na rede, ou seja, este padrão não define o protocolo de comunicação. Assim como para o padrão RS-232, tal fato caracteriza uma grande vantagem devido a flexibilidade de configuração da rede, pois o desenvolvedor ou usuário da rede tem a possibilidade de implementar protocolos de comunicação existentes, bem como desenvolver um protocolo próprio e específico para a aplicação.

Os protocolos de comunicação ASCII são os mais simples e comumente adotados durante a fase de desenvolvimento e de testes de sistemas. As mensagens transmitidas

geralmente são constituídas por um caractere de início, o endereço de destino, a operação a ser executada, parâmetros da operação ou resultados e campo de *checksum*. Os códigos adotados e o tamanho de cada um destes campos são determinados pelo desenvolvedor do protocolo, não havendo padrões estabelecidos. A única recomendação refere-se ao campo de *checksum*, que é utilizado para a verificação de integridade das mensagens transmitidas. Há algoritmos bem elaborados, como o *Cyclic Redundancy Check* (CRC), para a determinação dos valores a serem inseridos neste campo para cada mensagem enviada (PARK et al., 2003). De modo simplificado, o valor inserido neste campo é resultado do somatório dos valores decimais representados por cada um dos caracteres que constituem determinada mensagem. No momento em que a solicitação é construída, uma função de *checksum* preenche este campo e, quando a mesma chega ao local de destino, uma função verifica se o *checksum* informado é igual ao valor obtido após o processamento da mensagem; se for igual, então a mensagem é válida e a resposta será retornada com um novo campo de *checksum*, constituindo um processo cíclico.

Abaixo é apresentado um exemplo hipotético de uma solicitação baseada em um protocolo ASCII, na qual: o caractere de início é um *; o endereço de destino da mensagem é dispositivo 02; deseja-se efetuar uma operação de leitura, cujo código é L, do sensor identificado como 05; o campo de *checksum* é preenchido por uma função, sendo que o resultado pode não ser legível.

Caractere de início	Endereço de destino		Código da operação	Argumentos da operação		Checksum	
*	0	2	L	0	5	?	?

Apesar da simplicidade e flexibilidade para elaborar um protocolo ASCII do modo que bem entender, várias limitações pode ser mencionadas. Park et al. (2003) esclarecem que protocolos deste tipo são lentos e tornam-se inadequados a medida que as redes tornam-se maiores e requerem velocidades de comunicação maiores. Sendo assim, são empregados apenas em redes pequenas, com baixa velocidade de comunicação, em que, geralmente um dispositivo mestre comunica-se com alguns dispositivos escravos. Outra limitação, devido a inexistência de padrões para protocolos ASCII, diz respeito a dificuldade ou impossibilidade de integrar dispositivos com este protocolo a dispositivos comerciais com protocolos padronizados.

Até o momento tratou-se de aplicações em que o meio físico para transmissão de dados requer cabos. Entretanto, alternativas ao uso de fios para comunicação entre dispositivos são propostas em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), as quais são constituídas por nós sensores, que são dispositivos autônomos com capacidade de sensoriamento,

processamento e comunicação. Um nó sensor é um módulo constituído de microcontrolador, dispositivo de armazenamento de dados, sensores, conversores analógico-digital (ADCs), transceptor de radiofrequência e fonte de alimentação (CULLER; ESTRIN; SRIVASTAVA, 2004). Os nós individualmente possuem pouca capacidade computacional, mas quando conectados formando uma rede de sensores permitem a realização de tarefas complexas (LOUREIRO et al., 2003). Kim e Evans (2009) afirmam que o controle de sistemas de irrigação baseado no uso de RSSF apresenta-se como alternativa potencial para otimizar o uso da água, uma vez que variáveis de solo e clima determinantes para o manejo da irrigação podem ser monitoradas em tempo real.

Dentre os protocolos de comunicação sem-fio disponíveis, Zigbee é considerada a tecnologia mais promissora para aplicações agrícolas que envolvem RSSF, devido ao baixo consumo e simplicidade para configuração e operação da rede (WANG; ZHANG; WANG, 2006).

3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PARA CONTROLE DA IRRIGAÇÃO

3.1 Generalidades

A solução proposta para o controle automático e individualizado da irrigação em áreas experimentais foi desenvolvida nas duas seguintes etapas.

A Etapa 1 descreve a solução de automação elaborada para 3 áreas experimentais com problemas bastante similares. Nesta etapa, teve-se como objetivo o desenvolvimento de hardware e software necessários para o acionamento de válvulas solenóides e motobombas de acordo com instruções do usuário, constituindo um sistema de controle malha aberta. Nesta etapa descreveu-se o primeiro protótipo do Módulo para Controle de Atuadores (MCA-I) e também da primeira versão do aplicativo supervisor necessário para o controle dos MCAs a partir de um computador.

A Etapa 2 descreve a integração de hardware e software para automação do controle de atuadores, com base em dados provenientes de transdutores de pressão acoplados a tensiômetros e de células de carga operando como mini-lisímetros. Nesta etapa, apresenta-se a segunda versão dos Módulos para Controle de Atuadores (MCA-II), bem como o desenvolvimento dos Módulos para Aquisição de Dados (MAD) e do aplicativo supervisor utilizado.

3.2 Etapa 1

3.2.1 Caracterização do problema

A primeira versão do sistema de controle teve por finalidade automatizar o acionamento de válvulas e motobombas em 3 áreas experimentais envolvendo irrigação (áreas experimentais 1, 2 e 3). Os experimentos foram conduzidos no Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ-USP, caracterizando uma parceria entre pesquisadores do local.

Antes de prosseguir é importante destacar que esta pesquisa está focada no desenvolvimento de módulos controladores de irrigação que possam ser empregados nas mais diversas situações, sendo que os experimentos mencionados servem apenas para demonstrar alguns dos problemas que requerem automação em áreas experimentais. Uma vez detectados estes problemas, a presente pesquisa visa propor soluções para os mesmos e avaliar as

soluções propostas nas referidas áreas experimentais. Portanto, detalhes sobre os aspectos agronômicos ou resultados relacionados aos 3 experimentos mencionados a seguir não constituem objeto de interesse deste trabalho, sendo pertinentes a outras pesquisas.

As áreas experimentais 1 e 2 caracterizam-se pelo cultivo de cana-de-açúcar e citrus em ambiente protegido, sendo que, cada área é constituída por um sistema de irrigação independente utilizado para irrigar 56 vasos (caixas de concreto com capacidade de 500L), nos quais o fornecimento de água é individual e variável ao longo dos eventos de irrigação (Figura 3). O fornecimento de água em cada um dos vasos é controlado por válvulas solenóides. O manejo da irrigação nestas áreas é realizado com base em tensiômetros instalados nos vasos, sendo que a leitura dos mesmos é efetuada manualmente. Os experimentos realizados em ambas as áreas envolveram a comparação do desempenho de cultivares sob os níveis de tratamento 100% da evapotranspiração (T1) e 70 % da mesma (T2), adotando-se turno de rega de 3 dias. Além disso, foram avaliados dois tipos de solo, um com textura arenosa e o outro com textura argilosa.

Na área experimental 3 foi conduzido um experimento envolvendo a avaliação da tolerância de rosas a diferentes frequências de irrigação (Figura 4). Estabeleceu-se 4 níveis de tratamentos cujos critérios foram baseados no fator de disponibilidade de água no solo (f), sendo: T1: $f=0,15$; T2: $f=0,30$; T3: $f=0,45$; T4: $f=0,60$. Uma vez caracterizado o início da irrigação, a quantidade de água a ser aplicada foi calculada com a finalidade de elevar o conteúdo de água no solo até a capacidade de campo. Esta área é constituída por 74 canteiros, nos quais o fornecimento de água também é controlado por válvulas solenóides. O manejo da irrigação é realizado com base em tensiômetros instalados nos canteiros, sendo que a leitura dos mesmos também é efetuada manualmente.

Nas 3 áreas o problema de automação é similar, sendo que: pode ser necessário irrigar diariamente; as lâminas de irrigação são independentes para cada vaso/canteiro; e, as lâminas de irrigação podem variar a cada evento de irrigação. Além disso, o número de atuadores a ser controlado em cada uma das áreas é relativamente grande o que dificulta e até mesmo inviabiliza a programação diária de cada atuador em uma interface no próprio controlador de irrigação, como seria no caso do emprego de equipamentos comerciais. Assim sendo, para facilitar e agilizar as tarefas, torna-se essencial o desenvolvimento de um controlador com interface de comunicação com computadores, bem como um aplicativo que permita a programação dos tempos de operação das motobombas e válvulas.

Figura 3 - Áreas experimentais 1 e 2

Figura 4 - Área experimental 3

3.2.2 Solução proposta

Os controladores microprocessados desenvolvidos para as situações apresentadas caracterizam controladores malha aberta, sendo que apenas atuam no acionamento de válvulas e motobombas, não havendo nenhum mecanismo de verificação de processos pelo emprego de sensores ou dispositivos similares. Além disso, optou-se por desenvolver um sistema de

controle centralizado, constituído de módulos com capacidade de controlar 30 atuadores, sendo que, a princípio não há limitação do número de módulos que podem operar simultaneamente interligados a um computador. Sendo assim, a função fundamental dos MCAs consiste em ligar ou desligar atuadores de acordo com instruções recebidas.

A solução descrita a seguir caracteriza uma aplicação Mestre/Escravo, na qual o computador provido do aplicativo supervisorio é responsável pelo controle dos módulos microprocessados, e por consequência, da execução de tarefas. A partir de definições e configurações realizadas pelo usuário na interface do aplicativo supervisorio, são geradas solicitações codificadas de acordo com o protocolo de comunicação desenvolvido, sendo que estas permitem o controle das tarefas executadas pela rede interligada de módulos.

O MCA-I tem como componente principal o microcontrolador PIC16F877A, caracterizado por dispor de 40 pinos, dos quais 30 foram utilizados como I/Os para acionamento de atuadores. Considerando a variedade de dispositivos passíveis de serem utilizados como atuadores em áreas experimentais de irrigação, o emprego de relês para controle individual de atuadores torna-se indispensável. Relês eletromecânicos são extremamente versáteis, sendo que os modelos utilizados requerem 12 V e 60 mA para acionamento, sendo capazes de atuar no controle de dispositivos alimentados com corrente contínua ou alternada sob tensão elétrica de até 250 V. Os I/Os do microcontrolador fornecem sinais de 0 ou 5 V com corrente de até 25 mA. O ULN2803, permite o controle de até 8 relês, atuando como uma interface de potência necessária para que o microcontrolador seja capaz de acionar os relês e, por consequência os atuadores.

Conforme demonstrado na Figura 5, o circuito elétrico necessário para o controle de um atuador é simples, entretanto, frente ao número de atuadores a serem controlados tornou-se necessária a elaboração de sub-módulos para facilitar eventuais operações de reparo. Assim sendo, cada módulo foi dividido em 5 sub-módulos interligados, sendo: um Sub-Módulo de Processamento (SMP), dois Sub-Módulos de Seleção (SMS) e dois Sub-Módulos de Acionamento (SMA).

Os Sub-Módulos de Seleção (SMS) permitem a interferência direta do usuário no controle dos atuadores. Utilizando interruptores tipo alavanca de 3 posições, o usuário pode optar por manter cada atuador operando automaticamente, sob comando do microcontrolador; desligar o atuador; ou ainda, ligar manualmente e independente das instruções do microcontrolador. Cada interruptor controla um atuador, sendo que leds indicam o seu estado. Os SMS operam entre o SMP e os SMA. A Figura 6 ilustra o SMS construído.

Figura 5 - Esquema elétrico do MCA-I com detalhes dos componentes utilizados para o acionamento de um atuador

Os Sub-Módulos de Acionamento (SMA) têm como constituintes principais os relês eletromecânicos reversíveis, que a partir de sinais de 12 Vcc controlam os atuadores, como pode ser visualizado na Figura 7. A alimentação dos atuadores é realizada conectando-se o fornecimento de energia a blocos de terminal localizados na parte direita das placas, sendo

que a alimentação dos 8 relês superiores pode ser diferenciada da alimentação dos 7 relês inferiores. Para as válvulas solenóides utilizadas neste trabalho, o fornecimento de energia é comum a todos relês, sendo adotada a tensão elétrica de 127 Vac. Entretanto, nada impediria que atuadores que operassem com 12 Vcc, 24 Vac ou 220 Vac fossem utilizados. Capacitores foram adicionados a este circuito eletrônico, com a função de atenuar ruídos de origem indutiva, provenientes das válvulas solenóides. A ausência destes capacitores no circuito eletrônico provoca o travamento da rotina executada pelo microcontrolador.

Figura 6 - Visão geral do SMS: (a) cabo de conexão com o SMA, (b) interruptor tipo alavanca com 3 posições, (c) led indicador de estado e resistor limitador de corrente, (d) cabo de conexão com o SMP, (e) alimentação de 12 Vcc

Figura 7 - Visão geral do SMA: (a) alimentação dos atuadores, (b) relê, (c) conexão com o SMS, (d) cabo de conexão com os atuadores, (e) alimentação 12 Vcc

O Sub-Módulo de Processamento (SMP) tem por finalidade monitorar e decodificar mensagens providas da interface serial entre o computador e o controlador, ativando estados de 0 ou 5 V em I/Os do microcontrolador conforme as instruções recebidas.

O protocolo de comunicação ASCII desenvolvido para o sistema de controle consiste no envio de solicitações a partir do computador, as quais são constituídas por 5 caracteres, cujos significados são:

- Caractere 1: deve ser um “s” (status ou situação);
- Caractere 2: indica se o atuador será desligado ou ligado, podendo ser “0” ou “1”, respectivamente;
- Caractere 3: conforme descrito, cada módulo possui como dispositivo principal um microcontrolador que é capaz de agir no acionamento de 30 atuadores. Sendo assim, o caractere 3 é uma letra de “a” a “z”, que identifica qual microcontrolador deverá responder a mensagem transmitida;
- Caracteres 4 e 5: são números inteiros de 2 dígitos variando entre “01” e “30”, que indicam qual atuador será controlado.

Então, como exemplos: se a mensagem “s1b23” for transmitida, apenas o módulo que contém o “microcontrolador b” responderá a solicitação ligando o atuador número 23; se a mensagem “s0a05” for transmitida, apenas o módulo que contém o “microcontrolador a” responderá a solicitação desligando o atuador número 05.

A comunicação entre um dos SMP e o computador baseia-se no padrão RS-232, tendo como meio físico um cabo manga com três vias (RX, TX e GND). Já a conexão entre os SMPs também é realizada por cabos com três vias, mas que operam como um barramento padrão serial TTL. Através deste barramento, as solicitações enviadas pelo computador chegam a todos os SMP interligados, sendo que a solicitação só é processada pelo SMP que contém o microcontrolador especificado na solicitação e programado para interpretar tal solicitação. Na Figura 8 apresenta-se uma visão geral do SMP.

Baseado no que foi apresentado, três sistemas para controle automático da irrigação foram instalados em quadros de comando. Dois destes sistemas dispõem de recursos para controle de 60 atuadores, conforme se apresenta na Figura 9A e um para controle de 90 atuadores (Figura 9B). Conforme é demonstrado nas figuras, o sistema de controle automático possui dispositivos de acionamento e proteção do conjunto motobomba.

Portanto, nas áreas experimentais 1 e 2 foram instalados o sistema para controle automático da irrigação com capacidade de controlar 60 válvulas, sendo utilizadas 56 saídas de controle. Na área 3 foi instalado o sistema para controle de 90 válvulas, sendo utilizadas 74 saídas de controle.

Figura 8 - Visão geral do SMP: (a) cabo de conexão com o SMS 1, (b) ULN2803, (c) microcontrolador PIC16F877, (d) cabo de conexão com o SMS 2, (e) alimentação 12 Vcc, (f) MAX232, (g) barramento serial TTL, (h) interface serial RS-232 com o computador

Figura 9 - Visão geral dos controladores instalados nas áreas experimentais: A) Sistema com capacidade para acionar 60 atuadores, em que (a) fonte 12 V - 3 A, (b) minicontator e (c) disjuntor-motor; B) Sistema com capacidade para acionar 90 atuadores

O aplicativo desenvolvido e instalado nos computadores localizados nas áreas experimentais permite inserir manualmente os tempos de operação de cada atuador conforme exibido na interface do software ilustrada na Figura 10; ou ainda, carregar um arquivo de texto com estrutura pré-definida conforme apresentado na Figura 11, sendo esta a forma mais utilizada pelos usuários.

Conforme se pode observar na Figura 11, o usuário insere apenas números que identificam os atuadores e tempos de operação de cada atuador, havendo ponto-e-vírgula entre os mesmos. Assim sendo, verifica-se que o aplicativo oculta o processo de codificação dessas instruções de acordo com o protocolo de comunicação já descrito, facilitando bastante seu uso por parte dos usuários. O aplicativo também tem a função de monitorar o tempo e desligar os atuadores na medida em que o tempo é esgotado. Há ainda a possibilidade de agendar rotinas de irrigação, bastando definir data e horário de início da rotina e arquivo de texto a ser carregado no momento que antecede a irrigação.

Figura 10 - Aplicativo para controle de 90 atuadores na área experimental 3

Figura 11 - Estrutura do arquivo de texto reconhecido pelo aplicativo para inserção dos tempos de operação de atuadores

3.3 Etapa 2

3.3.1 Caracterização do problema e generalidades

Durante observações realizadas na Etapa 1, evidenciou-se a demanda de automatizar as tarefas de aquisição de dados de sensores e prover mecanismos para controle individualizado e automatizado da irrigação em cada unidade com base nestes dados. Uma vez atribuídos os tratamentos às respectivas unidades, observou-se a existência de uma rotina constante de leitura de dados, cálculo de tempos de irrigação e execução da irrigação em cada unidade.

Frente à infinidade de sensores disponíveis para estimativa do consumo de água pelas plantas, optou-se neste trabalho por elaborar uma solução para aquisição de dados de dois tipos de sensores. O primeiro tipo são transdutores de pressão que operam conectados a tensiômetros, cuja finalidade é permitir o monitoramento do potencial mátrico de água no solo. O segundo tipo são mini-lisímetros de pesagem por célula de carga, utilizados para a determinação direta da evapotranspiração em vasos. Para cada uma das opções, foram implementados modos distintos de manejo da irrigação, conforme será discutido no item 3.3.5.1.

Além disso, os módulos apresentados no experimento 1 sofreram pequenas mudanças, porém a finalidade dos mesmos continuou sendo o acionamento de atuadores que propiciam o fornecimento individualizado de água em vasos ou canteiros. Também foram desenvolvidos Módulos para Aquisição de Dados (MADs), cuja finalidade consiste na aquisição de dados de células de carga e de transdutores de pressão acoplados a tensiômetros. Ambos os tipos de módulos (MCAs e MADs) estão interligados por uma rede RS-232/TTL a um computador, sendo este responsável por controlá-los. Assim sendo, o sistema que será descrito, também caracteriza uma aplicação Mestre/Escravo, na qual o computador gerencia as atividades executadas pelos módulos. Na Figura 12 ilustra-se o sistema proposto.

Na sequência serão descritos os seguintes tópicos:

- Módulos para Aquisição de Dados (MADs);
- Módulos para Controle de Atuadores – Protótipo 2 (MCA-II);
- Padrão e protocolo de comunicação empregados para comunicação entre os módulos e o computador;

- Aplicativo supervisorio desenvolvido para gerenciamento do sistema automatizado; e,
- Área experimental montada para demonstração das funcionalidades do sistema.

Figura 12 - Diagrama de operação do sistema para automação do monitoramento e controle da irrigação em áreas experimentais

3.3.2 Módulos para aquisição de dados (MAD)

Os MADs têm como função receber, interpretar e responder a solicitações da rede, apresentando leituras de sensores. Estes módulos têm como componente central o microcontrolador dsPIC30F3013, caracterizado pela arquitetura 16-bit, encapsulamento DIP com 28 pinos, 10 canais de conversão analógico-digital com 12 bits de resolução e 24 kbytes de memória programável.

Dois multiplexadores analógicos HEF4067 foram empregados para possibilitar a aquisição de sinais de até 32 sensores utilizando apenas dois canais ADC do microcontrolador. Os MADs permitem a aquisição de dados de sensores com sinal analógico de saída entre 0 e 5 Vcc. Na Figura 13 apresenta-se o diagrama de funcionamento do MAD; na Figura 14 apresenta-se o esquema elétrico utilizado para ligação entre o microcontrolador dsPIC30F3013 e os dois multiplexadores HEF4067; e, na Figura 15 uma imagem do MAD com a descrição de seus principais componentes.

Cada transdutor de pressão acoplado a um tensiômetro foi interligado a um dos canais de aquisição de dados do MAD, assim como cada célula de carga foi ligada a um MAD-CC e este a um dos canais de aquisição de dados do MAD.

Os transdutores de pressão utilizados foram transdutores fabricados pela Freescale, modelo MPX5100DP, que operam com sinal de resposta analógico de 0 a 5 V para a faixa de pressão de 0 a 100 kPa. Já as células de carga utilizadas operam na faixa de 0 a 10 kg e foram retiradas de balanças comercializadas para uso geral.

Figura 13 - Diagrama de funcionamento do Módulo para Aquisição de Dados (MAD)

Figura 14 - Esquema elétrico de ligação do microcontrolador com os multiplexadores analógicos

Figura 15 - Módulo para Aquisição de Dados (MAD): a) Conector para acoplamento de sensores; b) Multiplexador analógico; c) Microcontrolador; d) Conector para interligar módulos; e, e) Circuitos reguladores de tensão responsáveis pelo fornecimento de energia ao MAD e aos sensores

Figura 16 - Esquema elétrico do módulo utilizado para fornecimento de energia e amplificação de sinal proveniente de célula de carga (MAD-CC)

Figura 17 - Módulo utilizado entre cada célula de carga e o MAD (MAD-CC): a) Conector para o MAD; b) Conector para a célula de carga; c) Trimpot para ajuste do desvio de zero, no sinal de resposta da célula de carga; d) Circuito integrado ICL7660, fonte simétrica 5 Vcc; e) Resistor de ganho utilizado pelo amplificador de sinal; e, f) Amplificador de instrumentação INA125

3.3.3 Módulos para controle de atuadores – Protótipo 2 (MCA-II)

O MCA-II contém duas modificações do MCA-I. A principal modificação refere-se ao redimensionamento de placas e redução do tamanho das mesmas, visando redução do espaço requerido para montá-las em um quadro de comando, assim como facilitar eventuais rotinas de reparo. Cada MCA-II dispõe de recursos para controle de até 16 atuadores, sendo que o microcontrolador PIC16F877A foi substituído pelo PIC16F876A e a dimensão dos submódulos foi reduzida de 15 x 20 cm para 10 x 10 cm, nos SMP e SMS, e para 10 x 15 cm no SMA.

Outra modificação foi uma correção no circuito do sub-módulo de acionamento (SMA) do MCA-I. Boylestad e Nashelsky (2004) descrevem o efeito chamado “golpe indutivo”, que, resumidamente, consiste em uma sobretensão de até centenas de volts ocasionada pela abertura de uma chave que fornece energia para um elemento indutivo, sendo que esta sobretensão pode danificar componentes do sistema. Para o caso do SMS, as chaves são os relês e os elementos indutivos são as válvulas solenóides e os minicontatores. Boylestad e Nashelsky (2004) recomendam a proteção do sistema utilizando um arranjo Resistor-Capacitor (RC) instalado em paralelo com o elemento indutivo. Este arranjo RC de proteção também é conhecido como circuito *snubber*, sendo responsável por amortecer oscilações, controlar a taxa de variação da tensão e/ou corrente e atenuar sobretensões. Com base nessas informações, adicionou-se um circuito *snubber* em paralelo com cada válvula

solenóide a fim de atenuar o golpe indutivo que eventualmente poderia danificar o sistema eletrônico.

Figura 18 - Módulo para Controle de Atuadores - Protótipo 2 (MCA-II): a) Sub-módulo de Acionamento (SMA); b) Sub-módulo de Processamento (SMP); e, c) Sub-módulo de Seleção (SMS)

3.3.4 Padrão e protocolo de comunicação entre módulos e computador

Tanto os MCAs como os MADs são constituídos por microcontroladores PIC ou dsPIC, sendo que ambos apresentam interface serial padrão TTL. Considerando que os módulos serão sempre instalados em um mesmo quadro de comando, e o comprimento do barramento de comunicação será bastante curto (< 2 m), manteve-se o padrão TTL para comunicação entre módulos. Desta maneira, o meio físico de comunicação é constituído por um cabo com 3 condutores, cujas finalidades seriam transmissão, recepção e tensão de referência (terra). Esta opção é bastante fácil para implementar e não requer nenhum dispositivo adicional para comunicação entre módulos. Além disso, experiências anteriores, descritas no item 3.2 e 4.1, de comunicação entre microcontroladores usando o padrão TTL apresentaram funcionamento adequado, não sendo verificada falha ou perda de dados em momento algum. Esta evidência sustenta a manutenção do padrão TTL para comunicação entre módulos, desde que os módulos estejam próximos, preferencialmente em um mesmo quadro de comando.

Uma vez que o computador dispõe de interface RS-232 adicionou-se um módulo para conversão de sinais RS-232 em TTL e vice-versa, sendo que este módulo foi instalado entre o computador e o restante dos módulos.

Figura 19 – a) Esquema de comunicação entre o computador e os módulos; b) Módulo conversor RS-232/TTL

O protocolo desenvolvido para comunicação entre o computador e os módulos, baseia-se em protocolo ASCII (PARK et al., 2003), sendo caracterizado por mensagens constituídas por 11 caracteres transmitidos no formato hexadecimal, conforme formato descrito na Tabela 1. O quinto byte apresentado na Tabela 1 identifica a operação solicitada ao módulo, sendo que as operações válidas para os MCA-II e MAD são descritas na Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente. Para cada solicitação efetuada, o módulo gera uma mensagem de resposta que pode ser uma confirmação de execução de tarefa, retorno de leitura de sensor ou código de erro, conforme se descreve na Tabela 4.

Tabela 1 - Formato das solicitações empregadas para comunicação entre o computador e os módulos

Byte	Valor (hexadecimal)	Descrição da mensagem
1	0x2A	Caracteres de início
2	0x2A	
3	0x00 .. 0xFF	Endereço de destino da mensagem
4	0x00 .. 0xFF	Endereço de origem da mensagem
5	0x00 .. 0xFF	Operação a ser executada pelo módulo
6	0x00 .. 0xFF	Argumentos da operação
7	0x00 .. 0xFF	
8	0x00 .. 0xFF	
9	0x00 .. 0xFF	
10	0x25	Caracteres de fim
11	0x25	

Tabela 2 - Operações e argumentos válidos para solicitações aos MCA-II

Valor do byte 5	Argumentos válidos				Descrição da solicitação
	Byte 6	Byte 7	Byte 8	Byte 9	
0x01	0x00	0x00	0x00	0x00 .. 0x0F	Liga o atuador especificado no argumento 9, cuja faixa de valores permite o controle individual dos 16 atuadores existentes no MCA-II
0x02	0x00	0x00	0x00	0x00 .. 0x0F	Desliga o atuador especificado no argumento 9, cuja faixa de valores permite o controle individual dos 16 atuadores existentes no MCA-II
0x03	0x00	0x00	0x00	0x00	Liga todos os atuadores existentes no módulo solicitado
0x04	0x00	0x00	0x00	0x00	Desliga todos os atuadores existentes no módulo

Tabela 3 - Operações e argumentos válidos para solicitações aos MAD

Valor do byte 5	Argumentos válidos				Descrição da solicitação
	Byte 6	Byte 7	Byte 8	Byte 9	
0x20	0x00	0x00	0x00	0x00 .. 0x1F	Aquisição de dados do sensor indicado no argumento 9, cuja faixa de valores permite selecionar um dos 32 sensores disponíveis no MAD.

Tabela 4 - Mensagens retornadas pelo módulos quando uma solicitação é efetuada

Tipo de módulo	Valor do byte 5	Argumentos válidos				Descrição da solicitação
		Byte 6	Byte 7	Byte 8	Byte 9	
MCA-II	0xD0	0x00	0x00	0x00	0x00	Solicitação executada com sucesso
	0xE0	0x00	0x00	0x00	0x01	Erro: Operação inválida
	0xE0	0x00	0x00	0x00	0x02	Erro: Atuador inexistente no endereço solicitado
MAD	0x23	0..4	0..9	0..9	0..9	Retorna o valor decimal correspondente a leitura do sensor solicitado. Este valor varia de 0000 a 4095.
	0xE0	0x00	0x00	0x00	0x01	Erro: Operação inválida
	0xE0	0x00	0x00	0x00	0x03	Erro: Sensor inexistente no endereço solicitado

3.3.5 Aplicativo supervisor

O aplicativo supervisor foi desenvolvido em Delphi utilizando a linguagem Object Pascal e seguindo conceitos de programação orientada a objetos. Grande parte das classes criadas representam o Modelo Entidade-Relacional (MER) discutido no item 3.3.5.2. Além disso, efetuou-se um esforço para desenvolver o aplicativo respeitando o modelo Model-View-Controller (MVC), a fim de assegurar a divisão das funcionalidades do aplicativo em

camadas, mantê-lo mais organizado e facilitar a realização de modificações ou aprimoramentos futuros.

A camada *Model* e, portanto, todas as operações envolvendo banco de dados foram mantidas em *Data Modules*. As telas de interface com o usuário foram organizadas em *VCL Frames* ligadas a um *VCL Form*, caracterizando a camada *View*. A camada *Controller* foi constituída por várias classes e bibliotecas de funções, responsáveis pelo controle de informação no aplicativo, pela comunicação com os módulos microprocessados e pela execução de tarefas executadas em intervalos de tempo pré-definidos.

Sem dúvidas o desenvolvimento do aplicativo supervisorio constitui a fase mais complexa desta pesquisa, uma vez que o mesmo é responsável pela tomada decisões e gerenciamento de todos os módulos conectados a rede. Assim sendo, este aplicativo deve dispor dos seguintes itens para que funcionalidades mínimas do sistema sejam asseguradas:

- a) Manter um banco de dados contendo informação que define:
 - A quantidade, os tipos e parâmetros de operação de módulos interligados e que constituem o sistema para automação;
 - Relacionamentos entre unidades, tratamentos, solos, sensores, atuadores e outros, utilizados para a definição de critérios para o manejo da irrigação individualizado, bem como para o armazenamento de registros de irrigação e leituras de sensores.
- b) Prover mecanismos para gerenciamento de inúmeros módulos cadastrados no banco de dados;
- c) Prover mecanismos para que cada unidade existente na área experimental seja caracterizada e relacionada ao respectivo solo, tratamento, sensor e atuador, a fim de que seja possível estabelecer uma infinidade de combinações entre estes itens e garanta-se a versatilidade do sistema;
- d) Assegurar que a interface do aplicativo reorganize-se automaticamente (conteúdo dinâmico) com base nos dados cadastrados no banco de dados, a fim de que a complexidade envolvida com o controle dos módulos torne-se transparente ao usuário;
- e) Prover mecanismos para tomada de decisão quanto ao manejo individualizado da irrigação na área experimental, com base em dados mantidos no banco de dados.

3.3.5.1 Modos de manejo da irrigação implementados no aplicativo supervisorio

a) Baseado no uso de tensiômetros

O manejo da irrigação utilizando tensiômetros se baseia em atributos do solo, sendo que a medida de potencial mátrico serve para indicar o momento em que a irrigação deve ser iniciada, quando se trabalha com turno de rega variável. Porém quando o turno de rega é fixo, o potencial mátrico acusado pelo tensiômetro, permite estimar a quantidade de água a ser aplicada para elevar o conteúdo de água no solo à capacidade de campo ou a outro valor de potencial mátrico pré-definido.

Para condições de campo, o valor do potencial mátrico que caracteriza o momento de início da irrigação é determinado com base na tolerância da cultura ao estresse hídrico, sendo que, quanto menor a tolerância da cultura ao estresse hídrico mais este valor deve se aproximar do valor correspondente ao conteúdo de água no solo na capacidade de campo e mais freqüentes são as irrigações. Além disso, a quantidade de água aplicada geralmente visa elevar o conteúdo de água no solo para a capacidade de campo, exceto em condições nas quais o estresse hídrico seja desejado devido a aspectos agronômicos favorecidos por esta condição.

Em pesquisas envolvendo a avaliação de culturas sob diferentes condições de suprimento de água, o potencial mátrico crítico é determinado de acordo com os tratamentos definidos pelo pesquisador. Da mesma forma, em pesquisas avaliando condições de estresse hídrico contínuo, a lâmina de irrigação estabelecida nos tratamentos visa elevar o conteúdo de água no solo a valores inferiores àquele que proporcionaria a condição de capacidade de campo.

Portanto, visando a versatilidade do sistema proposto, o aplicativo supervisorio contém as seguintes funcionalidades relacionadas ao manejo da irrigação, quando utilizados tensiômetros. Para cada unidade (vaso ou canteiro), o início da irrigação pode ser determinado com base nos 3 seguintes critérios: a) conteúdo inferior de água no solo (θ_{inf}), que deve estar entre θ_{sup} e θ_{PMP} ; b) fator de disponibilidade de água no solo – f ; ou, c) frequência de irrigação. Uma vez caracterizado o momento de iniciar a irrigação, a lâmina a ser aplicada é calculada com base nos dados de solo e da unidade, e ainda no conteúdo superior de água no solo (θ_{sup}), cujo valor deve ser menor ou igual ao conteúdo de água no solo à capacidade de campo (θ_{CC}). Quando o critério selecionado for frequência de irrigação, o tempo de irrigação

na unidade é calculado com base no conteúdo de água no solo determinado no momento que antecede a irrigação. Portanto, o tempo de irrigação em determinada unidade é calculado conforme as Eq. 1, Eq. 2 ou Eq. 3, respectivamente para os critérios a, b ou c descritos.

$$t = \frac{(\theta_{sup} - \theta_{inf}) Z A}{N q E_a} \quad \text{Eq. 1}$$

$$t = \frac{(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) Z f A}{N q E_a} \quad \text{Eq. 2}$$

$$t = \frac{(\theta_{sup} - \theta_{atual}) Z A}{N q E_a} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que:

- t : Tempo de irrigação na unidade (h);
- θ_{CC} : Conteúdo de água no solo na capacidade de campo, à base de volume ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);
- θ_{PMP} : Conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente, à base de volume ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);
- θ_{sup} : Conteúdo superior de água no solo, à base de volume ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);
- θ_{inf} : Conteúdo inferior de água no solo, à base de volume ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);
- θ_{atual} : Conteúdo de água no solo no momento que antecede a irrigação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);
- Z : Profundidade efetiva do sistema radicular (mm);
- A : Área superficial da unidade (m^2);
- f : Fator de disponibilidade de água no solo (-);
- N : Número de emissores instalados na unidade (-);
- q : Vazão média de cada emissor (L h^{-1}); e,
- E_a : Eficiência de aplicação (-).

A estimativa do conteúdo de água no solo em função do potencial mátrico, acusado por tensiômetros, geralmente é realizada utilizando a equação de Van Genuchten (1980) ou a equação do tipo potencial, descritas respectivamente pelas Eq. 4 e Eq. 5. Deste modo, para utilizar tensiômetros é sempre necessário selecionar uma das equações e informar os coeficientes da mesma ao aplicativo.

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\psi|)^n]^m} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\theta(\psi) = a |\psi|^{-b} \quad \text{Eq. 5}$$

Em que:

- $\theta(\psi)$: Conteúdo de água no solo, para um dado potencial mátrico ψ ;

- θ_r : Conteúdo residual de água no solo;
 θ_s : Conteúdo de água no solo saturado;
 α : Coeficiente de ajuste da equação de Van Genuchten (m^{-1});
 n, m : Coeficientes de ajuste da equação de Van Genuchten; e,
 a, b : Coeficientes de ajuste da equação potencial.

b) Baseado no uso de mini-lisímetros de pesagem por célula de carga

Conforme discutido, lisímetros são instrumentos que permitem a determinação direta da evapotranspiração, sendo instalados enterrados e em condições representativas de determinada cultura. Dentre outras finalidades, os dados de evapotranspiração obtidos em lisímetros costumam ser extrapolados para o restante da área ou até mesmo para a região.

Em lisimetria, a variação de massa ocorrida em determinado intervalo de tempo é atribuída como entrada ou saída de água no sistema, de modo que chuva, irrigação e drenagem não devem ser levados em conta no cálculo da evapotranspiração (CARVALHO et al., 2007). Além disso, geralmente despreza-se o acúmulo de biomassa devido ao crescimento da planta nos intervalos de leitura de 24 h. Assim, a evapotranspiração ocorrida em um intervalo de tempo é calculada pela Eq. 6.

$$ET = \frac{M_{i-1} - M_i}{A_{lisim} \rho_a} 1000 \quad \text{Eq. 6}$$

Em que:

- ET : Evapotranspiração (mm);
 M_i : Massa atual (kg);
 M_{i-1} : Massa anterior (kg);
 A_{lisim} : Área superficial do lisímetro (m^2);
 ρ_a : Massa específica da água, considerada igual a 1000 kg m^{-3} .

Como uma alternativa ao uso de tensiômetros e ao manejo da irrigação baseado em parâmetros do solo, propõe-se a instalação de célula de carga sob cada vaso cultivado, estabelecendo um aparato que será tratado como mini-lisímetro, a fim de permitir o monitoramento individualizado da evapotranspiração ao longo do cultivo e estabelecer estratégias de manejo da irrigação com base na evapotranspiração.

Em pesquisas nas quais o consumo de água é estimado com base em métodos que determinam direta ou indiretamente a evapotranspiração da cultura, observa-se que os

tratamentos são definidos em termos de porcentagem da evapotranspiração tomada como referência, a exemplo dos trabalhos de Frizzzone et al. (1995), Folegatti, Casarini e Blanco (2001), Cararo e Duarte (2002). Quando se adota turno de rega variável também é necessário definir um valor de evapotranspiração acumulada, no qual a irrigação deverá ser iniciada.

Deste modo, o aplicativo supervisorio desenvolvido contém as seguintes funcionalidades relacionadas ao manejo da irrigação, quando utilizados mini-lisímetros. Para cada vaso, o início da irrigação pode ser determinado com base em um valor de evapotranspiração acumulada ou na frequência de irrigação desejada. Já, a quantidade de água a ser aplicada é determinada com base em frações da evapotranspiração diária ou acumulada, sendo estas frações estabelecidas nos tratamentos que caracterizam a pesquisa. Caracterizado o início da irrigação em determinado vaso, o aplicativo executa a seguinte rotina: 1) calcula a massa de água a ser aplicada no vaso (Eq. 7); 2) efetua a leitura da massa do vaso no instante que antecede a irrigação; 3) inicia a irrigação efetuando leituras de massa em intervalos de 5 s; 4) cessa a irrigação quando a massa atingir o valor correspondente a massa do instante inicial somada com a massa de água a ser aplicada; e, 5) zera a evapotranspiração acumulada no período entre a irrigação atual e a anterior.

$$m_a = \rho_a A_{vaso} ET P_{ET} \quad \text{Eq. 7}$$

Em que:

- m_a : Massa de água a ser aplicada no vaso (kg);
- ρ_a : Massa específica da água, considerada igual a 1000 kg m^{-3} ;
- A_{vaso} : Área superficial do vaso (m^2);
- ET : Evapotranspiração acumulada e acusada pelo sensor de referência (m); e,
- P_{ET} : Fração da evapotranspiração a ser aplicada (-).

Para as unidades nas quais forem atribuídos tratamentos, cuja lâmina de irrigação for equivalente a fração da evapotranspiração potencial, há a necessidade de designar um sensor responsável por fornecer a evapotranspiração da cultura em condições de adequado suprimento hídrico. Portanto, o sensor adotado como referência só deve ser o sensor da própria unidade quando a fração da evapotranspiração a ser aplicada for igual a 1. Em todos os outros casos, deve-se adotar um sensor de referência de outra unidade na qual esta fração seja igual a 1. Para estes casos, a célula de carga sob os vasos não seria utilizada como ferramenta para manejo da irrigação, mas serviria para propiciar um controle mais exato da massa de água aplicada na unidade e para fornecer dados da evapotranspiração da cultura em condições de estresse hídrico.

3.3.5.2 Estrutura do banco de dados

Uma das etapas iniciais do desenvolvimento do aplicativo supervisor consistiu na modelagem do banco de dados. Em projetos de banco de dados, o Modelo Entidade-Relacionamento (MER) é o mais utilizado para a representação e entendimento dos dados que compõem a essência de um sistema. Um MER consiste na representação de um conjunto de objetos básicos chamados entidades e nos relacionamentos entre esses objetos, tendo como objetivo descrever conceitualmente a estrutura de um banco de dados (MACHADO; ABREU, 2004). Deste modo, ilustra-se na Figura 20 o modelo entidade-relacionamento elaborado para o sistema proposto.

Este modelo pode ser analisado iniciando-se pela entidade “Unidades”, que contém os atributos necessários para descrever os vasos ou canteiros (*nmeUnidade*), com a respectiva área de superfície (*areaSup*), vazão dos emissores (*qEmissores*) e eficiência de irrigação (*Ei*).

A campo, sabe-se que cada unidade (vaso ou canteiro) contém um tipo de solo; um atuador (válvula solenóide) responsável pelo fornecimento de água na mesma; um sensor para monitoramento do consumo de água na unidade; um tratamento experimental estabelecido para a unidade; e, registros de irrigação. A abstração desta realidade foi demonstrada nos relacionamentos estabelecidos entre a entidade “Unidades” e as entidades “Solos”, “Atuadores”, “Sensores”, “Tratamentos” e “Irrigacoes”.

A entidade “Atuadores” mantém a identificação dos atuadores (*nmeAtuador*) e o tipo de atuador (*tipoAtuador*). Uma vez que cada atuador é controlado por um MCA, justifica-se a relação entre as entidades “Atuadores” e “MCA”. A entidade “MCA” contém a identificação (*nmeMCA*) e o endereço para comunicação com o módulo (*enderecoMCA*). Conforme mencionado, existem Módulos para Controle de Atuadores (MCA) e Módulos para Aquisição de Dados (MAD) e da mesma forma que há a relação entre atuadores e os respectivos módulos, há também a relação entre as entidades “Sensores” e “MAD”. Além disso, para cada sensor é necessário informar a identificação (*nmeSensor*), tipo (*tipoSensor*), coeficientes de ajuste, admitindo sinal com resposta linear (*coefA* e *coefB*), unidade de medida indicada após a conversão de sinal (*unidadeSaida*).

Figura 20 - Modelo Entidade-Relacionamento (MER) do banco de dados implementado no aplicativo supervisorio

A entidade “Solos” contém os seguintes atributos necessários para a descrição de um determinado solo: identificação (*nmeSolo*), unidade na capacidade de campo (*UCC*), unidade no ponto de murcha permanente (*UPMP*) e densidade global (*Dg*). O atributo *Z* representa a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura e apesar de descrever uma propriedade dependente da cultura foi associado à entidade “Solos”. Além disso, para fins de manejo da irrigação utilizando tensiômetros, é necessário que parâmetros que caracterizam a curva de retenção de determinado solo estejam disponíveis, podendo ser utilizado o Modelo de Van Genuchten ou Modelo Potencial. Para maior versatilidade do aplicativo, julgou-se importante permitir que o usuário selecione o modelo preferido para o ajuste de dados de determinado solo. Para atender a este requisito, observa-se no MER que as entidades “VanGenuchten” e “Potencial” estão relacionadas à entidade “Solos”, deste modo, para um determinado solo pode-se armazenar os parâmetros da equação que melhor descrevê-lo.

A entidade “Tratamentos” contém atributos necessários para a descrição dos tratamentos que compõem um experimento, sendo que para o sistema automatizado proposto há categorias distintas para a definição de tratamentos. Conforme já foi descrito, cada unidade contém um sensor responsável por monitorar o consumo de água, sendo que este pode ser um tensiômetro ou um mini-lisímetro. Com base na situação descrita no item 3.3.5.1, o manejo da irrigação em determinada unidade depende do tipo de sensor instalado na mesma, e consequentemente, o tratamento a ser atribuído a uma unidade pode estabelecer critérios para manejar a irrigação com base em parâmetros do solo (entidade “ManejoViaSolo”) ou em parâmetros atrelados a evapotranspiração (entidade “ManejoViaET”). Os atributos existentes nas entidades “ManejoViaSolo” e “ManejoViaET” são suficientes para descrever os critérios de manejo da irrigação estabelecidos no item 3.3.5.1.

Os registros de irrigação em cada unidade são mantidos de acordo com o modelo estabelecido na entidade “Irigacoes”, a qual contém atributos que permitem descrever a data e hora de início (*dataInicio* e *horaInicio*), bem como a hora de finalização (*horaFim*) de um evento de irrigação. Já os registros de leituras de sensores são organizados na entidade “Leituras”, mantendo-se os atributos data, hora e leitura de cada um dos sensores cadastrados.

3.3.5.3 Interface com o banco de dados

O Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) utilizado foi o MySQL. A partir do MER apresentado, efetuou-se a modelagem lógica e a codificação SQL para implementação do banco de dados necessário para o aplicativo. A interface para cadastro, edição e exclusão de dados foi elaborada com o objetivo de tornar simples e intuitivo o emprego do aplicativo por usuários com um treinamento básico sobre o mesmo. Esta interface está organizada em abas que contém cadastros de unidades, solos, tratamentos, módulos, sensores, atuadores, leituras de sensores e registros de irrigação. Tudo o que foi mencionado na descrição do MER foi implementado nesta interface, sendo que o detalhamento individual das abas desta interface resultaria em uma repetição desnecessária.

Entretanto, alguns dos atributos descritos no MER armazenam códigos utilizados pelo aplicativo supervisorio, sendo que estes atributos merecem identificação para que possam ser compreendidos pelo usuário. Para facilitar a compreensão do detalhamento apresentado na Tabela 5, recomenda-se atenção aos modos de manejo da irrigação expostos no item 3.3.5.1, bem como a observação da Figura 20 e da descrição apresentada no item 3.3.5.2.

Figura 21 - Interface do aplicativo supervisorio com o banco de dados ilustrando a tela para cadastro de unidades

Tabela 5 – Significado de valores disponíveis para escolha em determinados campos do banco de dados

Entidade	Atributo	Valor	Significado
Sensores	tipoSensor	0	Sensor ocioso ou desativado
		1	Transdutor de pressão acoplado a tensiômetro
		2	Mini-lisímetro de pesagem por célula de carga
Atuadores	tipoAtuador	0	Atuador desativado
		1	Válvula solenóide
		2	Motobomba
Solos	tipoAjusteCurva	0	Equação de Van Genuchten
		1	Equação Potencial
Tratamentos	tipoManejo	0	Manejo com base em dados de solo, exclusivo para uso quando o sensor utilizado na unidade for do tipo 1 (transdutor de pressão acoplado a tensiômetro)
		1	Manejo com base em dados de evapotranspiração, exclusivo para uso quando o sensor utilizado na unidade for do tipo 2 (Mini-lisímetro de pesagem por célula de carga)
ManejoViaET	criterioET	0	Evapotranspiração acumulada (mm)
		1	Frequência de irrigação (dias)
ManejoViaSolo	criterioSolo	0	Conteúdo inferior de água no solo – θ_{inf} ($m^3 m^{-3}$)
		1	Fator de disponibilidade de água – f (-)
		2	Frequência de irrigação (dias)

3.3.5.4 Interface de configurações

A interface de configurações, ilustrada na Figura 22, permite efetuar-se os seguintes ajustes:

- Ativar/Desativar os Módulos para Aquisição de Dados;
- Ativar/Desativar sistema automático para controle da irrigação;
- Armazenar ou não registros de operação de atuadores no banco de dados;
- Armazenar ou não as leituras de sensores no banco de dados;

- Ativar/Desativar a limpeza da tubulação no início de cada irrigação, abrindo uma válvula solenóide instalada em uma extremidade da área experimental;
- Definir o intervalo de aquisição de dados de sensores;
- Definir o horário para tomada de decisões e execução de irrigação na área (utilizado quando a opção sistema automático estiver ativada); e,
- Ajustar porta COM e *baudrate* utilizados para comunicação com os módulos.

Figura 22 - Interface de configurações do aplicativo supervisor

3.3.5.5 Interface de controle

A Interface de Controle foi desenvolvida com o objetivo de disponibilizar uma tela para fácil acompanhamento das condições do experimento. Mantém-se uma lista de todas as unidades cadastradas no banco, com os respectivos tratamentos, sensores e atuadores. Em cada unidade, é possível visualizar a última leitura do sensor; acionar atuadores manualmente; ou ainda, definir tempos de operação para cada atuador e acionar uma rotina responsável por desligá-los na medida em que o tempo estabelecido for se esgotando (Figura 23).

Quando o sistema estiver configurado para operar no “manual”, é possível agendar tarefas para serem iniciadas em data e horários pré-estabelecidos, de modo que os tempos de operação são mantidos em um arquivo de texto seguindo formato similar àquele estabelecido na Figura 11, com a diferença que o número utilizado para identificar o atuador deve ser idêntico ao ID do atuador cadastrado no banco de dados.

Figura 23 - Interface de controle do aplicativo supervisorio

Uma funcionalidade muito útil implementada na interface de controle foi a utilização de componentes visuais que indicam de um modo simples a disponibilidade de água na unidade. Quando o manejo da irrigação na unidade for baseado em leituras de um tensiômetro, carrega-se o componente ilustrado na Figura 24a, no qual é possível visualizar rapidamente: 1) a umidade atual do solo na unidade (seta vermelha); a umidade correspondente ao ponto de murcha permanente (parte superior da barra roxa); a umidade correspondente a umidade crítica para iniciar a irrigação (parte superior da barra vermelha); a umidade superior que pode ser igual ou menor a umidade na capacidade de campo (parte superior da barra amarela); umidade do solo na capacidade de campo (parte superior da barra verde); zona de saturação do solo (barra azul). Nos casos em que a umidade superior é igual à umidade na capacidade de campo, a barra verde mencionada não é visível. Assim, por meio deste componente é possível visualizar rapidamente o tratamento atribuído a unidade, bem como parâmetros de solo críticos para o manejo da irrigação na mesma.

De modo similar, quando for utilizado um mini-lisímetro para o manejo da irrigação na unidade, os componentes ilustrados na Figura 24b são carregados, sendo que o componente superior indica a faixa de operação do mini-lisímetro e a massa instantânea, enquanto que o componente inferior indica a evapotranspiração acumulada desde a última irrigação, bem como a evapotranspiração acumulada que condiciona o critério para início da irrigação (limite entre a faixa verde e vermelha). Equivalente a situação descrita anteriormente, esta funcionalidade permite a visualização rápida da evapotranspiração acumulada na unidade bem como o tratamento atribuído a mesma.

Figura 24 - Componentes indicadores de disponibilidade de água na unidade: a) Componente indicador de umidade do solo utilizado para as unidades que utilizam tensiômetros; b) Componente indicador de massa e evapotranspiração acumulada, carregado quando a unidade dispôr de um mini-lisímetro

3.3.5.6 Interface “Log de eventos”

A interface “Log de eventos” (Figura 25) mantém a lista de todas as solicitações efetuadas pelo computador e as respostas dos módulos, sendo útil para detectar falhas na comunicação ou funcionamento inadequado dos módulos. Além disso, todos os eventos são automaticamente salvos em formato de texto no arquivo chamado “eventos.log”, enquanto que todos os registros de falha na comunicação são armazenados no arquivo “erros.log”.

Figura 25 - Interface "Log de Eventos" ilustrando solicitações não respondidas por um MCA

3.3.6 Demonstração a campo dos módulos para controle de atuadores e aquisição de dados

Antes de descrever a área experimental utilizada para os testes realizados, é importante esclarecer novamente que esta pesquisa está focada no desenvolvimento do sistema para automação, sendo que os aspectos agrônômicos associados ao experimento que será descrito fogem ao escopo deste trabalho. Além disso, é reconhecida a importância da execução de uma calibração criteriosa e avaliação de incerteza dos sensores utilizados em experimentos como o apresentado, entretanto, isto não foi executado neste trabalho. Portanto, ressalta-se que o experimento a seguir descrito deve ser analisado apenas como uma demonstração a campo do sistema desenvolvido.

O sistema foi instalado em ambiente protegido, sendo constituído por 6 vasos com 5 L de capacidade, nos quais o monitoramento do conteúdo de água no solo foi efetuado utilizando-se mini-lisímetros de pesagem por célula de carga; e, 6 vasos com 10 L de capacidade, onde instalaram-se tensiômetros providos de transdutores de pressão para determinação indireta do conteúdo de água no solo.

Uma vez que a escalabilidade dos módulos para controle de atuadores foi avaliada com sucesso nos experimentos descritos no item 3.2, optou-se por implantar este sistema em uma área experimental pequena visando demonstrar as funcionalidades de controle automático da irrigação.

O solo utilizado nos vasos foi o mesmo utilizado e descrito por Lima (2009), sendo que as condições experimentais também foram bastante similares, uma vez que ambos os experimentos foram conduzidos em ambiente protegido no Departamento de Engenharia de Biosistemas – ESALQ/USP. Segundo o autor, o solo utilizado é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo com textura franco arenosa e denominado Série “Sertãozinho”. As seguintes propriedades físicas do solo foram determinadas por Lima (2009): densidade global $1,26 \text{ g cm}^{-3}$; densidade de partículas de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$; 73% de areia; 8% de silte; 19 % de argila; e, conteúdo de água no solo na capacidade de campo para as condições avaliadas igual a $0,2141 \text{ g g}^{-1}$. A curva de retenção também foi determinada para as condições experimentais, sendo que os dados obtidos pelo autor são apresentados na Figura 26.

Figura 26 - Curva de retenção de água no solo Franco Arenoso (LIMA, 2009)

Mudas de alface foram transplantadas para os vasos apenas para aumentar o consumo de água nos vasos e permitir uma avaliação do sistema automatizado em condições reais.

Na Figura 27 apresenta-se o quadro de comando instalado na área experimental 4 descrevendo os principais itens nele existentes. Na Figura 28 visualiza-se o experimento instalado com a finalidade de demonstrar as funcionalidades do sistema proposto.

A equação empregada nos transdutores de pressão para conversão de sinais digitais em unidade de medida de pressão (kPa) foi determinada com base na média de dados obtidos durante o ensaio de 3 transdutores submetidos a tensões crescentes, sendo que não foi efetuada repetições de medidas.

Já as células de carga foram calibradas individualmente, devido a grande variabilidade observada entre as mesmas. O procedimento adotado consistiu em um ensaio submetendo cada célula a massas com valores crescentes, na faixa de 0 a 10 kg.

Figura 27 - Quadro de comando contendo o sistema para automação proposto. a) MAD; b) Bornes para acoplamento do cabeamento com sinal de resposta proveniente de transdutores de pressão conectados a tensiômetros; c) Módulos intermediários para acoplamento de mini-lisímetros de pesagem por célula de carga; d) MCA-II; e) Bornes para acoplamento de atuadores; f) Módulo para conversão de sinais RS-232/TTL; g) Fonte 12 Vcc; e, h) Dispositivos de acionamento e proteção

Figura 28 - Experimento demonstrativo instalado em área experimental. Os 6 primeiros vasos a esquerda contêm tensiômetros e os 6 primeiros a direita são mini-lisímetros

4 DESEMPENHO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

4.1 Etapa 1

4.1.1 Observações realizadas nas áreas experimentais

A pesquisa foi executada seguindo a sugestão de Ayars e Phene (2007), de que a automação de sistemas de irrigação deve ser realizada gradualmente com a finalidade de compreender melhor o processo. Portanto, nesta etapa evidenciou-se um nível básico e inicial de automação, cujo objetivo foi apenas o controle de atuadores (válvulas e motobombas) em um sistema de controle malha aberta, seguindo tempos pré-definidos pelo usuário. Esta etapa foi essencial para a caracterização de alguns problemas de automação existentes em áreas experimentais, assim como para avaliação do protótipo MCA-I. Acerca deste experimento vários comentários serão expostos na sequência.

Primeiramente, o objetivo desta etapa foi atingido, sendo que os controladores operaram adequadamente no período avaliado entre 4 e 8 meses, dependendo da situação. Além disso, a versatilidade do sistema proposto foi validada, pois o mesmo atendeu as necessidades de três experimentos distintos instalados respectivamente em três áreas experimentais. A escalabilidade do sistema foi avaliada para o uso de até 3 módulos simultâneos, situação na qual o sistema operou normalmente.

A avaliação do sistema proposto em diferentes áreas e sob a percepção de outros pesquisadores, possibilitou maior discussão das necessidades de automação nas referidas áreas, culminando em contribuições para o sistema desenvolvido e para aprimoramentos futuros.

Na sequência serão apresentados dados dos experimentos anteriormente descritos, acerca dos quais o interesse limita-se exclusivamente aos tempos de operação dos atuadores, como forma de demonstrar que o sistema proposto operou por longo período a campo. Para tanto, serão apresentados alguns resultados obtidos nas áreas experimentais 1 e 3, sendo que dados relativos ao sistema de controle instalado na área experimental 2 não foram disponibilizados.

Na Figura 29 apresentam-se os tempos de operação em 28 vasos, onde foram avaliadas 14 variedades de cana-de-açúcar (V1 a V14) cultivadas em solo arenoso, aplicando 100% e 70% da quantidade de água requerida. Da mesma forma, na Figura 30 apresentam-se os

tempos de operação em 28 vasos, onde foram avaliadas 14 variedades de cana-de-açúcar (V15 a V28) cultivadas em solo argiloso, aplicando 100% e 70% da quantidade de água requerida. Os dados apresentados se referem ao período de 02/09/2011 a 04/05/2012, no qual foram registrados 86 eventos de irrigação sendo que o tempo total de operação dos atuadores variou entre 30 e 80 horas.

Figura 29 - Tempo de irrigação para cada uma das variedades avaliadas em solo textura arenosa durante o período de 02/09/11 a 04/05/12, considerando o suprimento total (T1: 100%) e parcial (T2: 70%) do consumo na condição de referência

Figura 30 - Tempo de irrigação para cada uma das variedades avaliadas em solo de textura argilosa durante o período de 02/09/11 a 04/05/12, considerando o suprimento total (T1: 100%) e parcial (T2: 70%) do consumo na condição de referência

Além disso, nesta área experimental evidenciou-se o quanto é importante dispor de funcionalidades para importação fácil e rápida de tempos de operação dos atuadores em cada irrigação. Na Figura 31 demonstra-se os tempos de operação de apenas 3 atuadores nas 40

primeiras irrigações realizadas, ficando evidente que estes tempos variam ao longo das irrigações e em cada uma das unidades. Tal fato reforça a dificuldade do emprego de modelos simples de controladores comerciais em áreas experimentais, uma vez que a maioria destes não dispõe de funcionalidades que proporcionem rápida importação de dados.

Figura 31 - Duração das 40 primeiras irrigações realizadas nos vasos contendo as variedades V1, V10 e V20, demonstrando o quanto os tempos de irrigação variam ao longo das irrigações e entre os vasos

Na Figura 32 apresentam-se os tempos de operação de cada um dos atuadores para cada irrigação, pré-estabelecidos para atender aos requisitos da pesquisa conduzida na área experimental 3. Nesta área, o usuário determinou a campo a vazão média dos emissores em cada um dos canteiros, sendo que as pequenas diferenças observadas nos tempos de irrigação de atuadores pertencentes a um mesmo tratamento devem-se a variabilidade na vazão dos emissores entre canteiros.

Figura 32 - Tempos de operação para cada irrigação na área experimental 3, pré-estabelecidos em função de diferentes tratamentos, avaliando fator de disponibilidade de água no solo no cultivo de rosas

Na Figura 33 demonstra-se o número de irrigações efetuadas em cada um dos tratamentos durante o período avaliado, que foi de outubro de 2011 a fevereiro de 2012. Para as unidades pertencentes ao tratamento 1, que condiciona a aplicação de lâminas de irrigação menores e mais freqüentes, efetuou-se 39 irrigações. Já para o tratamento 4, cujo fator de disponibilidade caracteriza a aplicação de lâminas de irrigação maiores e menos freqüentes, efetuou-se apenas 9 irrigações.

Figura 33 - Número de irrigações realizadas na área experimental 3

A Figura 34 apresenta o tempo total de operação de cada um dos atuadores, de modo que o atuador 34 operou durante 913,5 minutos e os atuadores responsáveis pelo controle da irrigação nas bordaduras operaram 660 minutos.

Figura 34 - Tempo total de operação dos atuadores na área experimental 3

A média de operação em cada um dos tratamentos foi respectivamente: T1 = 864,2 min; T2: 841,6 min; T3: 797,0 min; e, T4: 787,5 min. Com estes resultados, sugere-se que nos tratamentos em que a irrigação é mais frequente e, portanto, o solo é mantido sempre mais próximo a condição de capacidade de campo, o consumo de água tende a ser maior ocasionando tempos de irrigação maiores. Tal afirmação está de acordo com a literatura, uma vez que Bernardo, Soares e Mantovani (2006) afirmam que a evapotranspiração da cultura apresenta valores abaixo da evapotranspiração potencial a partir de determinados valores de umidade do solo. Ou seja, na medida que o solo perde água, o consumo hídrico da planta sofre redução e, por este motivo, os tratamentos que condicionaram maior frequência de irrigação apresentaram tempos de operação maiores.

Até a solução de automação ser elaborada, pesquisadores dedicavam muito tempo para o controle manual de motobombas e válvulas nas áreas experimentais. Segundo os usuários, o aplicativo desenvolvido apresenta interface intuitiva e de fácil utilização, sendo relatado que as rotinas estabelecidas foram executadas com exatidão ao longo do período avaliado, fato que assegura a confiabilidade desejada para o sistema. O formato do arquivo de texto adotado para agilizar a inserção dos tempos de operação de atuadores foi considerado simples e eficaz. Além disso, a funcionalidade de agendamento de tarefas mostrou-se útil, permitindo a eventual ausência do usuário na área experimental.

A concepção adotada no desenvolvimento dos módulos, de separar o circuito em sub-módulos, foi adequada permitindo fácil montagem dos painéis de controle, bem como fácil acesso às placas para eventual reparo.

Apesar de ser possível retirar o sub-módulo de seleção (SMS) do MCA-I e tornar o controle de atuadores dependente exclusivamente do computador, verificou-se que o acionamento manual de atuadores utilizando o SMS é essencial. Os usuários ressaltaram a necessidade desta funcionalidade em momentos de testes de atuadores ou emissores, ou ainda, quando é preciso efetuar reparos no sistema de irrigação relacionados a vazamento em linhas, desentupimento de gotejadores, substituição de válvulas solenóides danificadas, etc.

O programa implementado nos microcontroladores (*firmware*) que constituem os MCA-I, bem como o protocolo de comunicação ASCII desenvolvido, atenderam aos requisitos da aplicação e operaram adequadamente, sendo que não foram detectadas falhas ou erros na execução das rotinas requeridas nas áreas experimentais.

Uma das grandes preocupações desta etapa da pesquisa estava relacionada ao uso do padrão RS-232 e TTL para transmissão de dados entre o computador e vários módulos.

Todavia, não foram detectados problemas na comunicação entre módulos utilizando o padrão TTL, considerando todos os módulos instalados dentro de um quadro de comando em que o comprimento do barramento TTL foi menor que 1 m. Do mesmo modo, não houve problemas na comunicação entre módulos e o computador utilizando o padrão RS-232 com comprimentos máximo de cabo igual a 12 m na área experimental 3. Apesar de que não foram detectadas falhas durante a avaliação, sabe-se que estes padrões foram concebidos para a transmissão de dados somente entre dois dispositivos e não entre vários dispositivos como foi o caso descrito. O comprimento máximo de cabos utilizado para comunicação entre o computador e um dos MCA-I não superou 15 m, mantendo-se no limite de comprimento recomendado por Mackay et al. (2004). Entretanto, Park et al. (2003) afirmam que o padrão RS-232 apresenta uma série de limitações que o torna inadequado para transmissão de dados em ambientes industriais, sendo que estas limitações não foram detectadas neste experimento, provavelmente pelo fato dos módulos estarem muito próximos e isolados de interferências dentro de um quadro de comando metálico.

4.1.2 Custos com material para montagem e instalação

O material utilizado para construção de um MCA-I é apresentado na Tabela 6, sendo que os preços foram obtidos em sites de venda de componentes eletrônicos (Solda fria e Farnell Newark), em janeiro de 2012. O custo de material para construção de um MCA-I com capacidade para controle de 30 atuadores foi de R\$ 478,16. Para exemplo e noção de preços, um controlador de irrigação bastante simples e com capacidade para controle de 24 atuadores custa aproximadamente R\$ 2200,00 (marca Irritrol, modelo Total Control). O equipamento comercializado permite o agendamento de tarefas na interface do próprio controlador e apresenta custo relativamente baixo. Já o uso do MCA-I requer a instalação de um computador, entretanto apresenta como principal vantagem a facilidade e rapidez no agendamento de tarefas através de uma interface com o computador e uso de arquivos de texto. Para destacar esta importância em experimentos envolvendo irrigação, basta imaginar como seria trabalhoso o agendamento diário e individualizado de tempos de irrigação na área experimental 3, contendo 74 válvulas solenóides. Uma vez determinados os tempos de irrigação, seria necessário agendar os tempos, um a um, na interface de vários controladores do modelo mencionado, o que certamente demandaria muito tempo do usuário e acabaria

sendo tecnicamente inviável. Todavia, o mesmo procedimento requer apenas alguns segundos para ser executado no aplicativo desenvolvido para o MCA-I.

Por outro lado, há também controladores comercializados bastante sofisticados, como é o caso do controlador Galileo Wexx produzido pela Galcon, em que um único controlador é capaz de manipular até 200 válvulas, dispondo de aplicativo supervisorio e tecnologias de acesso remoto. Não há dúvidas, que equipamentos desta natureza dispõem de recursos mais do que suficientes para a automação de qualquer área experimental permitindo a execução de tarefas rapidamente e até com mais flexibilidade e recursos que o aplicativo desenvolvido para o MCA-I. Entretanto, evidenciou-se que sistemas para automação como este, apresentam custo restritivo para uso em áreas experimentais, pois, conforme cotação realizada em janeiro de 2012 a solução mínima para o controle de 100 válvulas custava R\$ 47.750,00. Comparativamente, o emprego de 4 unidades do MCA-I (R\$ 1912,64), aptos a controlar 120 válvulas, mais o custo de um computador simples (aproximadamente R\$ 1.000,00) totalizaria R\$ 2.912,64. Evidentemente há um custo significativo e que não foi contabilizado, relativo ao desenvolvimento do aplicativo supervisorio e do MCA-I, mas ainda assim, o sistema desenvolvido é muito mais barato que o comercializado e também é capaz de atender as mais diversas situações experimentais.

Tabela 6 - Lista de material e custos para construção de um Módulo de controle de atuadores - MCA-I

(continua)

ITEM	QTDE.	R\$/UN.	R\$
<u><i>Sub-módulo de processamento (SMP)</i></u>			
Capacitor eletrolítico 100 µF/50V	1	0,24	0,24
Capacitor eletrolítico 10 µF/50V	1	0,12	0,12
Capacitor eletrolítico 1 µF/50V	5	0,12	0,60
Capacitor cerâmico 100nF/16V	1	0,10	0,10
Capacitor cerâmico 27pF/16V	2	0,10	0,20
LM7805	1	0,99	0,99
Conector tipo bloco de terminal	1	1,97	1,97
Barra de pinos 1x40 180°	1	0,69	0,69
Resistor 470Ω - 1/8W	1	0,05	0,05
Resistor 4.7kΩ - 1/8W	1	0,05	0,05
Led 3 mm	1	0,60	0,60
MAX232	1	1,96	1,96
Conector DB9 90°	1	0,99	0,99
Suporte CI 40 pinos torneado	1	2,24	2,24
Suporte CI 18 pinos torneado	4	1,65	6,60
Suporte CI 16 pinos torneado	1	1,38	1,38
Cristal 4 MHz	1	0,50	0,50
Diodo 1N4007	1	0,15	0,15
ULN2803	4	1,99	7,96

Tabela 6 - Lista de material e custos para construção de um Módulo de controle de atuadores - MCA-I
(conclusão)

ITEM	QTDE.	R\$/UN.	R\$
Conector header sem trava 34 pinos macho	2	1,14	2,28
Conector latch 34 vias	2	0,78	1,56
Microcontrolador PIC16F877A-I/P	1	12,99	12,99
Fabricação da placa	1	100,00	100,00
SUB-TOTAL			144,22
<i>Sub-módulo de acionamento (SMA)</i>			
Relê 12V 1 polo 2 posições 5 terminais	15	1,79	26,85
Diodo 1N4007	15	0,15	2,25
Capacitor poliéster 0.1µF/250V	15	0,35	5,25
Conector header sem trava 34 pinos macho	1	1,14	1,14
Conector latch 34 vias	2	0,78	1,56
Barra de pinos 1x40 180°	1	0,69	0,69
Conector tipo bloco de terminal	3	1,97	5,91
Conector molex 4 vias (par)	3	0,80	2,40
Conector molex 3 vias (par)	1	0,80	0,80
Fabricação da placa	1	100,00	100,00
SUB-TOTAL			146,85
<i>Sub-módulo de seleção (SMS)</i>			
Chave alavanca 3 posições	15	3,14	47,10
Led 3 mm	15	0,60	9,00
Resistor 1 kΩ - 1/8W	15	0,05	0,75
Conector header sem trava 34 pinos macho	2	1,14	2,28
Conector latch 34 vias	2	0,78	1,56
Fabricação da placa	1	100,00	100,00
SUB-TOTAL			160,69
<i>Outros</i>			
Cabo flat 34 vias	2 m	4,20	8,40
Fio wire-wrap 28AWG	5 m	0,60	3,00
Rolo de solda 1mm	1	15,00	15,00
SUB-TOTAL			26,40
TOTAL			478,16

Na Tabela 7 descreve-se o custo total com material para automação do controle de atuadores na área experimental 3, constituída por 74 válvulas solenóides e 1 motobomba. Nesta área foram montados 3 módulos de controle de atuadores – MCA-I. Observa-se que o custo com material para automação do controle da irrigação na referida área ainda é bastante baixo (R\$ 4466,38), viabilizando a adoção da solução.

Tabela 7 - Custos com material para implantação do sistema de controle na área experimental 3

ITEM	QTDE.	R\$/UN.	R\$
MCA-I	3	478,16	1434,48
Quadro de comando 1.2 x 0.8 x 0.3 m	1	215,00	215,00
Minicontator WEG 110V	1	32,00	32,00
Disjuntor motor Moeller PKZMC-4A	1	115,00	115,00
Fonte 12V - 4A	1	50,00	50,00
Borne Sak 2.5 mm	90	1,76	158,40
Trilho DIM	2 m	2,00	4,00
Válvulas solenóides 110 Vac	75	6,90	517,50
Cabo 1.5 mm	1000 m	0,42	420,00
Motobomba KSB Hydrobloc P500 0,5CV	1	220,00	220,00
Computador	1	1000,00	1000,00
Outros			300,00
TOTAL			4466,38

4.1.3 Limitações detectadas e oportunidades de melhoria

As placas utilizadas em todos os sub-módulos apresentam dimensões de 15 x 20 cm, de modo que, o controlador instalado na área experimental 3, com capacidade para 90 atuadores, exigiu um quadro de comando relativamente grande, com dimensões de 1,2 x 0,8 x 0,3 m (Altura x Largura x Profundidade). A elaboração de placas menores seria interessante e apresentaria as seguintes vantagens: redução do custo com a fabricação de placas; redução do tamanho do quadro de comando; e, redução do espaço requerido para instalação do quadro de comando na área experimental.

O custo com cabos para interligar os quadros de comando a cada uma das válvulas solenóides existentes nas áreas experimentais pode ser interpretado como um fator limitante da arquitetura de hardware adotada e baseada em um sistema de controle centralizado. Na maior área experimental avaliada, área experimental 3 (90 atuadores), foram necessários aproximadamente 1000 m de cabos para interligar o quadro de comando e os atuadores. Esta área experimental é composta por duas estufas, cada uma com aproximadamente 7 m de largura e 12 m de comprimento, distantes em aproximadamente 4 m uma da outra. Ainda assim, pode-se dizer que a área experimental é pequena e exigiu grande quantidade de cabos. A adoção de um sistema de controle distribuído reduziria drasticamente os custos com cabos. Entretanto, com a distribuição de módulos na área, o padrão TTL ou RS-232 utilizado para comunicação entre módulos obrigatoriamente precisaria ser substituído devido às distâncias do cabeamento de comunicação. Como opções aos padrões TTL e RS-232 para interligar

módulos, pode-se mencionar o padrão RS-485 ou ainda padrões de comunicação sem-fio baseados no uso de dispositivos transceptores de rádio-frequência. Conforme Mackay et al. (2004), o padrão de comunicação mais utilizado na indústria é o RS-485, cuja principal vantagem é a robustez à ruídos e interferências. Portanto, visando robustez e confiabilidade sob condições experimentais adversas, seria interessante avaliar a substituição do padrão RS-232 e TTL pelo padrão RS-485.

Uma demanda detectada nas áreas experimentais acompanhadas, diz respeito à integração do controle de atuadores com a aquisição de dados de tensiômetros e tomada de decisão para manejo da irrigação. Ou seja, seria bastante interessante dispor de módulos para aquisição de dados de tensiômetros para operação conjunta com os módulos para controle de atuadores, de modo que, quando limites de disponibilidade de água no solo fossem detectados, os atuadores fossem acionados durante tempos calculados pelo próprio sistema. Desta forma, a interferência do usuário seria reduzida a configuração de limites de disponibilidade de água no solo em cada vaso ou canteiro, através de um aplicativo, e ainda, a rotinas de reparo ou manutenção do sistema de irrigação.

4.1.4 Falhas acidentais

Na área experimental 1 ocorreram duas falhas durante o período avaliado. Em uma das falhas detectou-se dano na fonte de alimentação 12 Vcc, sendo necessária sua substituição. Esta falha provavelmente foi ocasionada por descargas elétricas, que de algum modo atingiram o quadro de comando danificando a fonte de alimentação. A corrente elétrica consumida pelo sistema se manteve normal após a substituição da fonte. A outra falha ocorrida foi mais grave e danificou todos os circuitos integrados no SMP, bem como a fonte de alimentação. De algum modo um pequeno animal entrou no quadro de comando e causou curto circuito na placa do SMP.

4.2 Etapa 2

4.2.1 Comparação do sistema desenvolvido com trabalhos similares

Miranda (2003) e Miranda et al. (2005) descrevem um sistema microprocessado para monitoramento e controle individualizado da irrigação. Cada módulo dispõe de recursos para

controle e acionamento de uma válvula e aquisição de dados de 3 sensores, sendo que a rotina de irrigação é pré-estabelecida no módulo. Uma vez que os sensores acusam a umidade inferior crítica estabelecida, inicia-se a irrigação, que é cessada quando os sensores acusam a umidade desejada. Não é mencionada a existência de inter-comunicação entre módulos, nem interface para fácil re-configuração, sendo portanto um sistema pouco flexível e incapaz de atender aos requisitos de áreas experimentais descritos nesta tese. Entretanto, deve-se lembrar que o objetivo dos autores era desenvolver um sistema eletrônico para campo e não para áreas experimentais, onde a situação é consideravelmente mais complexa.

Coates et al. (2006a) desenvolveu um sistema eletrônico capaz de prover controle individual de microaspersores, similar ao proposto nesta pesquisa. Um computador é responsável por prover uma interface de configurações e definição de tarefas, bem como transmitir, via RF, essas tarefas para um módulo instalado no campo (*Drip Line Controller - DLP*). Por sua vez, o DLP é responsável por armazenar as instruções para execução de uma tarefa e gerenciar a execução da mesma. Em cada unidade ou planta há um pequeno módulo (*control circuit*) responsável pela aquisição de dados e controle de válvulas do tipo Latch, de modo que esses módulos são interligados ao DLP via cabos e utilizando o padrão RS-232 (Figura 35).

Figura 35 - Sistema eletrônico para controle da irrigação em cada planta (COATES et al., 2006b)

A breve descrição do trabalho realizado por Coates et al. (2006a) é importante para que se possa analisar vantagens e limitações do sistema proposto nesta pesquisa. A concepção de desenvolver módulos microprocessados instalados em cada unidade apresenta como aspectos positivos a redução de cabeamento na área, pois tanto instruções para acionamento de válvulas quanto leituras de diversos sensores instalados na planta, podem ser transmitidas para uma unidade de processamento através de sinais digitais. Por outro lado, o MCA-II requer apenas um microcontrolador para manipular vários atuadores, assim como o MAD é

capaz de efetuar a aquisição de dados de vários sensores com um único microcontrolador. Comparado a concepção de Coates et al. (2006a), o sistema apresentado nesta pesquisa permite economia em microcontroladores e módulos, entretanto implica em custos maiores com cabeamento instalado na área. O sistema de Coates et al. (2006a) apresenta ainda funcionalidades que permitem a detecção de falhas do sistema de irrigação em cada planta, aspecto muito interessante e que não foi estudado nesta pesquisa. Apesar de não ser parte dos objetivos estabelecidos, no sistema proposto, o monitoramento e reação a falhas requereriam o aprimoramento do aplicativo supervisorio, uma vez que o sistema para aquisição de dados e controle de atuadores já é versátil o suficiente para efetuar a aquisição de dados de diferentes tipos de sensores.

O módulo proposto por Fisher (2007) dedicado a aquisição de dados de sensores resistivos de umidade do solo (Watermark 200SS®) e sensores de temperatura (LM35), dispõe de 512 kbits de memória para armazenamento de dados e interface RS-232. É um pouco difícil comparar o MAD com o módulo desenvolvido por Fisher (2007), pois o propósito deste autor era apenas a aquisição e armazenamento de dados a baixo custo. Cada módulo dispõe de um multiplexador permitindo a aquisição de dados de até 8 sensores e apresentando custo de US\$20,00. O fato é que o MAD também poderia ser empregado para aquisição de dados de sensores de temperatura (LM35) sem nenhuma alteração, assim como para aquisição de dados de sensores resistivos de umidade do solo, requerendo um circuito oscilador adicional para gerar a corrente alterada de excitação dos sensores resistivos. A capacidade de armazenamento de dados, indisponível no MAD, acaba sendo suprida pelo banco de dados gerenciado pelo aplicativo supervisorio. Fisher e Kebede (2010) efetuaram algumas modificações no circuito descrito por Fisher (2007), sendo que cada módulo passou a ser dedicado a aquisição e armazenamento de dados de um sensor resistivo de umidade do solo, um sensor de temperatura do ar (LM75), um sensor de temperatura do solo (TC74) e um sensor de temperatura do dossel (MLX90614). As considerações efetuadas para a situação anterior continuam sendo válidas para esta situação.

4.2.2 Custos com material

O custo do material necessário para a construção do MAD foi de aproximadamente R\$300,00, tendo como elementos principais o custo de fabricação da placa, o microcontrolador e os multiplexadores analógicos. Do ponto de vista de projeto, o MCA-II

sofreu poucas mudanças, sendo que a principal foi a redução do tamanho dos módulos resultando em um custo com material de aproximadamente R\$ 350,00. Assim como na Etapa 1 (3.2), o sistema desenvolvido nesta etapa também requer o emprego de um computador para instalação do aplicativo supervisorio e controle da rede de módulos.

4.2.3 Calibração dos transdutores de pressão e das células de carga

Na Figura 36 apresenta-se a equação obtida a partir de dados de três transdutores de pressão avaliados. Conforme descrito por Camargo et al. (2011), estes transdutores apresentam sinal de resposta linear a variação de pressão.

Figura 36 - Equação empregada nos transdutores de pressão para conversão de sinais digitais em unidade de medida de pressão (kPa)

Acerca do processo de calibração das células de carga, inicialmente foi efetuada uma tentativa de calibração das mesmas empregando um único circuito com amplificação de sinal de aproximadamente 735 vezes. Os resultados apresentados na Figura 37 demonstram uma enorme variabilidade nos sinais de resposta entre as células de carga (CC), evidenciando a obrigatoriedade de calibrá-las individualmente e determinar o fator de amplificação de sinal para cada uma.

A partir do problema descrito, testou-se cada célula de carga e determinou-se o resistor de ganho a ser utilizado para que, quando fosse submetida a massa máxima (10 kg) o sinal amplificado de resposta não ultrapassasse 5 V. Uma vez testadas efetuou-se a calibração individual das células, obtendo-se as equações de calibração apresentadas na Tabela 8.

Figura 37 – Resultados do ensaio das 6 células de carga utilizando um único circuito amplificador de sinal com ganho de aproximadamente 735 vezes

Tabela 8 - Equações obtidas para a calibração individual das células de carga

Célula de carga	Fator de amplificação de sinal	Equação ajustada
1	736	$Y = 2,662 X - 7,100$
2	504	$Y = 2,648 X - 20,448$
3	1075	$Y = 2,685 X - 127,467$
4	736	$Y = 2,499 X - 10,465$
5	736	$Y = 2,845 X - 16,360$
6	736	$Y = 2,616 X - 51,638$

Y: Massa (g)

X: Valor digital indicado pelo ADC de 12 bits (decimal)

4.2.4 Dados de operação na área experimental

4.2.4.1 Efeitos da temperatura nas leituras dos tensiômetros

O primeiro teste efetuado a campo teve como objetivo avaliar o funcionamento do sistema de aquisição de dados (MAD) utilizado para a coleta de dados de transdutores de pressão acoplados a tensiômetros, bem como avaliar o módulo para controle de atuadores (MCA-II) operando conforme tempos informados pelo usuário através da interface do aplicativo supervisor. Portanto, nesta fase, manteve-se o sistema automático de controle desativado, de modo que a coleta de dados de sensores foi efetuada normalmente e a tomada de decisão sobre as irrigações ficou sob responsabilidade do usuário.

Este teste foi efetuado no período de 28/04/2012 a 07/05/2012, intervalo no qual se efetuou apenas uma irrigação com duração de 6 minutos nas 6 unidades contendo tensiômetros. A irrigação foi realizada em 05/05/2012 às 16:37, sendo que esta pode ser

observada no tempo acumulado de aproximadamente 185 horas nos gráficos apresentados na sequência (Figura 38). O MCA-II executou perfeitamente as instruções informadas na interface do aplicativo supervisorio. O tensiômetro instalado na unidade 2 apresentou problemas durante o período sendo que seus dados foram eliminados.

Nos gráficos apresentados evidencia-se o efeito da temperatura do ambiente na dispersão das leituras dos tensiômetros, sendo clara a instabilidade nas leituras realizadas entre 09:00 e 17:00. Buchter et al. (1999) relata o mesmo problema nos horários entre 10:00 e 18:00 e recomenda que as leituras sejam efetuadas fora destes períodos. O efeito da temperatura nas flutuações de leitura de tensiômetros vem sendo observado há muito tempo (RICHARDS, 1942 apud BUCHTER et al., 1999), sendo que geralmente as recomendações para minimizar estes efeitos consistem em construir o tensiômetro em material plástico (CASSEL; KLUTE, 1986 apud BUCHTER et al., 1999) e efetuar leituras dos tensiômetros sempre no mesmo horário do dia, preferencialmente pela manhã (RICHARDS, 1949 apud WARRICK et al., 1998). Erros nas leituras, decorrentes das flutuações diurnas de temperatura, tendem a ser mais evidentes à medida que o potencial matricial diminui, isto é, que o solo seca (COELHO; TEIXEIRA, 2004). Williams (1978) e Warrick et al. (1998) apresentam equacionamentos matemáticos que permitem estimar a magnitude da variação das leituras de tensão devido ao efeito da temperatura. Segundo os mesmos, os fatores que condicionam este fenômeno são variações na temperatura do ar presente na parte superior da câmara do tensiômetro; a condensação e evaporação entre a superfície líquida e a câmara de ar no interior do tensiômetro; a condutividade hidráulica do solo; e, a resistência da cápsula porosa do tensiômetro. Além disso, o transdutor de pressão utilizado também pode ter contribuído para as flutuações de leitura observadas em função das variações de temperatura.

Nos 3 primeiros dias de observação não foi verificada flutuação nas leituras de tensão nos horários mais quentes do dia, pois conforme os dados de temperatura do período, estes foram dias em que a amplitude térmica foi pequena. Para todos os outros dias, ou seja, a partir do tempo acumulado de 84 h, observou-se instabilidade nas leituras durante os períodos mais quentes do dia. Não foi evidenciada uma tendência comum a todas as unidades quanto às leituras realizadas nos horários mais quentes do dia, uma vez que, ao se analisar os gráficos da Figura 38, observa-se que: na unidade 1 os valores de tensão foram superestimados durante os horários mais quentes do dia; na unidade 3 houve momentos em que os valores foram superestimados (tempo acumulado de 72 a 144 horas) e houve momentos em que os mesmos foram subestimados (144 a 240 horas); e, nas unidades 4, 5 e 6 os valores de tensão foram

subestimados nos horários mais quentes do dia. Não foi possível estabelecer uma hipótese que justifique este comportamento aleatório evidenciado entre as unidades.

Figura 38 - Dados coletados no período de 28/04/2012 a 07/05/2012, nas unidades 1, 3, 4, 5 e 6, demonstrando o efeito da temperatura na dispersão de leituras de tensão acusadas pelos tensiômetros

O fato importante é que a instabilidade detectada na leitura dos tensiômetros ocasiona uma limitação para o sistema de controle automático proposto nesta pesquisa, uma vez que não podem ser tomadas decisões acerca do manejo da irrigação com base nas leituras realizadas durante os horários de instabilidade. Portanto, esta fase contribuiu para o conhecimento de um fenômeno até então desconsiderado na pesquisa e que implicou em modificações no aplicativo supervisorio.

4.2.4.2 Avaliação do sistema operando com o modo automático desativado

A segunda fase de testes teve como objetivo avaliar o MAD para aquisição de dados dos transdutores de pressão acoplados a tensiômetros, e também dos mini-lísímetros; e ainda,

prosseguir com os testes do MCA-II operando conforme tempos de operação definidos pelo usuário. Nesta fase efetuou-se uma tentativa de amenizar as flutuações nas leituras dos tensiômetros, envolvendo com papel alumínio a câmara contendo ar no tensiômetro.

Nesta fase, realizaram-se testes de 23/05/2012 a 11/06/2012, período no qual foram efetuadas 4 irrigações em todas as unidades avaliadas, sem diferenciação de tratamentos. Novamente, não foram apresentados dados da unidade 2 devido a problemas na operação do tensiômetro instalado na mesma.

Observa-se nos gráficos agrupados na Figura 39, que o problema da dispersão das leituras dos tensiômetros nos horários mais quentes do dia persistiu e a tentativa de envolver parte do tensiômetro com papel alumínio foi ineficaz. Possivelmente, o papel alumínio só evitou a ação direta da energia solar na câmara de ar, o que não impede que haja transferência de calor através do corpo do tensiômetro e, portanto, que os efeitos indesejados de flutuação das leituras persistam.

Figura 39 - Dados coletados entre 23/05/12 e 11/06/12, nas unidades 1 a 6, caracterizadas pelo manejo da irrigação baseado no uso de tensiômetros (modo de controle automático desativado)

Com base nos dados coletados no tempo acumulado entre 312 e 418 horas, evidenciou-se novamente que, em dias caracterizados por amplitude térmica menor, a instabilidade nas leituras dos tensiômetros também foi menor. Apesar de não ser objetivo desta pesquisa, outro detalhe que pode ser observado nos gráficos é a considerável diferença entre o consumo de água nas unidades para o mesmo período, sendo que isto é justificado pela grande desuniformidade das plantas utilizadas para o experimento.

Uma mudança interessante em relação a fase anterior de testes, foi a tendência de variação do potencial mátrico similar a todas as unidades durante os períodos mais quentes do dia. Observa-se em todas as unidades (Figura 39), que: quando a temperatura passa a aumentar há uma queda na leitura de tensão, a qual atinge um valor mínimo antes do horário mais quente do dia; na medida em que a temperatura volta a decrescer, as leituras de tensão voltam ao estado normal. Talvez o uso do papel alumínio envolvendo a câmara de ar do tensiômetro tenha contribuído para uma pequena redução dos efeitos da temperatura, culminando nestas observações.

Nas observações realizadas nas unidades 7 a 12, caracterizadas pelo manejo da irrigação baseado no uso de mini-lisímetros, também foi evidente o efeito indesejável da variação de temperatura nas células de carga. Analisando os gráficos agrupados na Figura 40, evidenciou-se que as células de carga utilizadas na unidade 7 e principalmente na unidade 9, foram bastante sensíveis aos efeitos da temperatura. O efeito observado é esperado em células de carga que não dispõem de mecanismos de compensação de temperatura. Sabe-se que células de carga são providas de extensômetros e estes são dispositivos que tem sua resistência alterada proporcionalmente a deformação da célula de carga, resultante de um esforço mecânico aplicado sobre a mesma. Indesejavelmente, células de carga de menor qualidade não dispõem de mecanismos de compensação de temperatura, sendo que mudanças na temperatura do ambiente implicam em deformações naturais no corpo da célula de carga e estas deformações são confundidas com esforços mecânicos e detectadas pelos extensômetros. Além disso, alterações na temperatura podem causar mudanças de resistividade dos dispositivos que constituem a Ponte de Wheatstone da célula de carga, implicando em alterações nas leituras acusadas pela célula de carga. Com base nos dados apresentados nos gráficos da Figura 40, evidencia-se que houve queda nas leituras de massa durante os horários mais quentes do dia. Uma vez que as células de carga utilizadas são de baixíssimo custo e qualidade questionável, não era esperada a existência de mecanismos de compensação de temperatura, o que justifica as oscilações de leituras em função da variação de temperatura.

Figura 40 - Dados coletados entre 23/05/12 e 11/06/12, nas unidades 7 a 12, caracterizadas pelo manejo da irrigação baseado no uso de mini-lisímetros (modo de controle automático desativado)

Frente a influência da temperatura nas leituras dos mini-lisímetros, novamente foi caracterizada uma limitação para o sistema proposto, para a qual se adotou a mesma solução

aplicada ao uso dos tensiômetros, ou seja, tomar decisões acerca do manejo da irrigação com base em leituras efetuadas fora dos horários mais quentes do dia.

Observou-se ainda, que entre o tempo acumulado de 312 e 408 horas, houve dias caracterizados por baixa amplitude térmica, nos quais a leitura dos mini-lisímetros permaneceu estável em todas as unidades.

Contudo, mantendo-se o foco desta pesquisa, verificou-se que o MAD, o MCA-II e o aplicativo supervisorio operaram perfeitamente na condição em que o sistema de controle automático permaneceu desativado, e portanto, os objetivos desta fase foram atingidos com sucesso.

A instabilidade nas leituras dos tensiômetros e mini-lisímetros pelo efeito de variação da temperatura, são problemas que apesar de detectados, não fazem parte do escopo e não serão discutidos com detalhe nesta pesquisa. Para contornar o efeito indesejável da temperatura sobre as leituras de tensiômetros e mini-lisímetros, decidiu-se que o sistema automático tomará decisões diárias com base em leituras realizadas às 8h da manhã, horário no qual não foi verificada influência negativa da temperatura nas leituras.

4.2.4.3 Avaliação do sistema operando com o modo automático ativado

Na fase final de testes, avaliou-se o sistema operando no modo automático, ou seja, uma vez configurado, o aplicativo supervisorio é responsável pelo monitoramento do consumo de água nas unidades e pela tomada de decisão acerca do momento e da quantidade de água a aplicar em cada unidade.

Conforme as premissas do sistema, primeiramente foi efetuada a configuração do sistema através da interface com o banco de dados (Figura 21), utilizando dados já descritos no item 3.3.6. Além disso, apenas para demonstração da versatilidade do sistema, estabeleceram-se os seguintes tratamentos para os vasos 1 a 6, nos quais o manejo da irrigação baseou-se no uso de tensiômetros:

- Tratamento 1: $U_{inf} = 0,135 \text{ g g}^{-1}$ e $U_{sup} = U_{CC} = 0,214 \text{ g g}^{-1}$ (Turno de rega variável);
- Tratamento 2: $U_{inf} = 0,119 \text{ g g}^{-1}$ e $U_{sup} = 0,183 \text{ g g}^{-1}$ (Turno de rega variável e déficit contínuo); e,
- Tratamento 3: $F = 2$ dias e $U_{sup} = U_{CC} = 0,214 \text{ g g}^{-1}$ (Turno de rega fixo).

Já para vasos equipados com mini-lisímetros, os tratamentos foram os seguintes:

- Tratamento 4: $P_{ET} = 100 \%$ e $ET_{acum} = 10 \text{ mm}$;

- Tratamento 5: $P_{ET} = 50 \%$ e $ET_{acum} = 10 \text{ mm}$; e,
- Tratamento 6: $P_{ET} = 100 \%$ e $F = 2 \text{ dias}$.

Os tratamentos mencionados foram atribuídos as unidades conforme se demonstra na Tabela 9.

Tabela 9 - Unidades, tipos de sensor e respectivos tratamentos

Tensiômetro		Mini-lisímetro		
Unidade	Tratamento	Unidade	Tratamento	Unidade contendo sensor de referência ¹
Vaso 1	1	Vaso 7	4	Vaso 7
Vaso 2	2	Vaso 8	5	Vaso 7
Vaso 3	3	Vaso 9	6	Vaso 9
Vaso 4	1	Vaso 10	4	Vaso 7
Vaso 5	2	Vaso 11	5	Vaso 7
Vaso 6	3	Vaso 12	6	Vaso 12

Nesta fase foram realizados testes de 17/06/2012 a 28/06/2012, período no qual não houve interferência humana na tomada de decisões e execução das irrigações. Diariamente as 8:00 o aplicativo supervisorio executava uma rotina de verificação da necessidade de irrigação em cada uma das unidades, levando em consideração todas as características da unidade e associadas a esta, conforme descrito no MER (Figura 20).

Nos gráficos agrupados na Figura 41, apresentam-se dados de temperatura, tensão da água no solo (ou potencial mátrico), irrigação, tensão superior e tensão inferior. Os dois últimos parâmetros citados são condicionados pelo tratamento atribuído a cada uma das unidades e definem a faixa desejada de potencial mátrico. O termo “tensão inferior” refere-se a tensão crítica que define o momento de iniciar a irrigação, enquanto que com o valor de “tensão superior” é possível estimar a lâmina de irrigação necessária (3.3.5a, Eq. 1).

Nas unidades 1 e 4 às quais se atribuiu o tratamento 1, houve duas irrigações durante o período avaliado. Observando-se o intervalo entre as tensões superior e inferior, evidencia-se que a tensão da água no solo manteve-se dentro da faixa estabelecida ao longo de todo o período, e que, portanto, o sistema automático executou adequadamente sua função de monitoramento e controle da irrigação. Uma vez que a tomada de decisões acerca da irrigação

¹ Conforme mencionado, quando mini-lisímetros forem utilizados e houver unidades nas quais os tratamentos condicionarem lâminas de irrigação inferiores a evapotranspiração da cultura, há a necessidade de designar um sensor responsável por fornecer a evapotranspiração da cultura em condições de adequado suprimento hídrico. Se isto não for feito a irrigação será cada vez menor nestas unidades e os critérios de manejo não serão obedecidos.

foi efetuada somente uma vez por dia, justifica-se a ocorrência de alguns dados de tensão além do limite de tensão inferior em determinados horários que antecedem a irrigação.

Nas unidades 2 e 5 às quais se atribuiu o tratamento 2, efetuou-se 3 irrigações no período avaliado. Assim como para a situação anteriormente descrita, demonstrou-se que o sistema automático atendeu aos requisitos estabelecidos para estas unidades, mantendo a tensão de água no solo dentro da faixa pré-definida.

Nas unidades 3 e 6, onde atribuiu-se o tratamento 3, cujo critério de manejo de irrigação condiciona uma frequência de irrigação de 2 dias, a tensão inferior não é um parâmetro necessário para os cálculos de lâmina e, portanto, não foi apresentado nos respectivos gráficos. Além disso, observa-se que a execução da irrigação sempre ocorreu em intervalos de 48 horas e que a quantidade de água aplicada sempre elevou o conteúdo de água no solo para a condição desejada. Apesar de não ter sido observado no período, se o potencial mátrico após as 48 horas ainda estivesse entre 0 kPa e a tensão superior, o aplicativo supervisorio consideraria que a irrigação seria desnecessária naquele período, avaliando novamente a condição no dia seguinte.

Os efeitos de temperatura observados nesta etapa foram similares àqueles discutidos na etapa anterior.

Com base nos dados apresentados, demonstra-se que o sistema proposto foi capaz de atender ao propósito para o qual foi desenvolvido, mantendo a tensão da água dentro das faixas condicionadas pelos tratamentos ou executando irrigação segundo a frequência de irrigação pré-estabelecida. Considerando as funcionalidades do aplicativo supervisorio e a possibilidade de configuração individual das unidades, evidencia-se que o sistema é bastante versátil, podendo ser empregado para automatizar tarefas nas mais diversas situações que envolvem o controle da irrigação usando tensiômetros como instrumentos de referência. Durante o período avaliado não foram detectadas falhas do sistema, fato que contribui para a confiabilidade do mesmo.

Nos gráficos agrupados na Figura 42, apresentam-se dados de temperatura, massa do vaso e irrigação. A variação de massa nos vasos entre os eventos de irrigação foi interpretada como sendo a evapotranspiração da cultura, de modo que o acúmulo de biomassa no período foi desprezado. Conforme mencionado, o sensor da unidade 7 foi adotado como sensor de referência para a estimativa de evapotranspiração nas unidades 7, 8, 10 e 11; enquanto que as unidades 9 e 12 foram manejadas com base na leitura de seus próprios sensores.

Figura 41 - Dados coletados entre 17/06/12 e 28/06/12, nas unidades 1 a 6, caracterizadas pelo manejo da irrigação baseado no uso de tensiômetros (modo de controle automático ativado)

Analisando primeiramente as unidades 7, 8 e 11, evidencia-se que o sistema operou adequadamente e aplicou as lâminas de irrigação com base nos tratamentos definidos e nas

leituras do sensor de referência instalado na unidade 7. A partir das irrigações realizadas na unidade 7, cujas lâminas aplicadas foram de 12,7, 12,4 e 10,4, verifica-se que as lâminas aplicadas em todas as irrigações nas unidades 8 e 11 foram aproximadamente 50 % daquelas aplicadas na unidade de referência, conforme era esperado.

Na unidade 10 os tempos de irrigação deveriam ser bastante similares àqueles observados na unidade 7, uma vez que o tratamento é o mesmo. Entretanto, os tempos e as lâminas de irrigação aplicadas foram bem maiores que o esperado, sendo que o gráfico demonstra claramente que houve drenagem nas 3 irrigações realizadas. Possivelmente o consumo hídrico na unidade 10 foi significativamente menor que aquele ocorrido na unidade 7, devido a desuniformidade visível das plantas entre os vasos. Uma vez que o método de manejo adotado considera a evapotranspiração ocorrida na unidade 7 como uma referência para as unidades 8, 10 e 11, erros como o observado podem ocorrer se o consumo na unidade de referência for maior que nas outras unidades. Além disso, provavelmente nos momentos que antecederam as irrigações, o solo da unidade 10 já estava com elevada umidade, sendo que a massa calculada certamente ocasionou o acúmulo de uma lâmina de água sobre o vaso e consequentemente a drenagem. De certo modo esta falha do método foi importante para demonstrar a necessidade de haver a pré-definição de um tempo máximo de irrigação em cada unidade, como forma de segurança, a fim de evitar uma situação extrema na qual o solo já estivesse quase saturado antes da irrigação e a massa calculada nunca fosse atingida devido ao equilíbrio entre a quantidade de água aplicada e a quantidade drenada na unidade. Para tanto, arbitrou-se no aplicativo um tempo de segurança de 1 hora, de modo que a irrigação é cessada em todas as unidades quando este tempo se esgotar. Os dados apresentados no gráfico da unidade 10 (Figura 42) demonstram o tempo de operação da válvula bem como a lâmina de irrigação calculada, considerando a vazão do emissor igual a 4 L h^{-1} . Devido a intensa drenagem ocorrida, os dados de lâmina aplicada apresentados para as outras situações não fazem sentido para este caso.

Na unidade 12 o controle da irrigação foi efetuada a cada 2 dias com base na leitura do sensor instalado na própria unidade, apresentando resultados coerentes.

Figura 42 - Dados coletados entre 17/06/12 e 28/06/12, nas unidades 7 a 12, caracterizadas pelo manejo da irrigação baseado no uso de mini-lisímetros (modo de controle automático ativado)

Assim como descrito e discutido na etapa anterior de testes, as leituras das células de carga foram afetadas pela variação diária de temperatura, sendo que as células utilizadas nas unidades 7 e 9 foram as mais sensíveis. Na unidade 9 a sensibilidade da célula de carga foi tão

grande a partir das 144 horas que se tornaria difícil identificar quando foram efetuadas as irrigações se não houvesse registro automático no aplicativo. Para exemplo da magnitude das variações ocorridas nesta unidade, apresenta-se na Figura 43 dados do dia 24/06 (intervalo entre 168 e 192 horas), onde se pode observar leituras estáveis até aproximadamente 8 h da manhã (176 horas). Para referência, se considerarmos a leitura de 5,007 kg efetuada nas 168 horas e a leitura de 4,965 kg efetuada nas 192 horas, verifica-se que a evapotranspiração da cultura durante este dia foi de aproximadamente 1,34 mm, para a área de superfície do vaso igual 0,03142 m². Entretanto, também se pode observar que após as 176 horas (8h da manhã), conforme a temperatura aumentou, a leitura de massa diminuiu. Acerca disto, a leitura média no intervalo entre 174 e 176 horas foi de 5,018 kg, enquanto que a leitura mínima entre o intervalo de 176 e 189 horas foi de 4,795 kg, o que implica em uma imprecisão de 7,1 mm de lâmina causada quase que totalmente pela variação de temperatura. Uma variação desta magnitude absolutamente compromete a tomada de decisão de controle da irrigação, uma vez que 7,1 mm é um valor que se espera observar em um intervalo de 2 ou mais dias de evapotranspiração no vaso. Com base nestes fatos, condena-se o uso de sensores de baixa qualidade como este utilizado na unidade 9, sob a justificativa de que um sensor assim fornece dados totalmente contestáveis comprometendo os resultados de uma pesquisa envolvendo irrigação. Da mesma forma, deve-se refletir com cautela a questão de selecionar sensores visando essencialmente baixo custo, recomendando-se a avaliação prévia da operação dos sensores no período que antecede a realização de uma pesquisa, especialmente para evitar o uso de sensores que poderiam comprometer o monitoramento do processo e consequentemente os resultados da pesquisa.

Figura 43 – Dados de massa e temperatura entre 168 e 192 horas de operação (dia 24/06), enfatizando o efeito da variação de temperatura nas leituras da célula de carga

4.2.4.4 Modificações de hardware e software a serem analisadas antes da elaboração de versões futuras do MAD e o do MCA

Na sequência serão listados alguns comentários que precisam ser considerados em trabalhos futuros que estejam relacionados com o uso ou aprimoramento do sistema proposto nesta pesquisa.

Conforme mostrado na Figura 15, o MAD além de ser responsável pela aquisição de dados de sensores, também dispõe de reguladores de tensão com capacidade de fornecer corrente de até 1,5 A, nas tensões elétricas de 12 V e 5 V. Quando este módulo foi projetado imaginou-se que seria conveniente concentrar tanto a alimentação de sensores, quanto o circuito digital de aquisição de dados no mesmo módulo, a fim de reduzir custos com placas de circuito impresso. Acerca disto, deve-se tomar precaução para que o consumo dos sensores conectados ao MAD não ultrapassem o limite mencionado de corrente elétrica. Outra possibilidade seria a separação da alimentação utilizada para o circuito digital (microcontrolador e multiplexadores) daquela utilizada para o circuito analógico (alimentação de sensores) a fim de reduzir ou evitar interferências e ruídos e por fim melhorar a qualidade do sistema de medição. Silveira (2011) em um trabalho de desenvolvimento de um sistema microprocessado utilizado para aquisição de dados de sensores, separou o circuito digital e o circuito analógico em duas placas, bem como, separou a alimentação dos circuitos, a fim de aumentar a segurança e evitar a interferência de uma placa na outra.

Ainda acerca do projeto de MADs, um aspecto interessante a ser comentado diz respeito ao número de sensores que podem ser ligados a um único módulo. O projeto atual do MAD emprega 2 multiplexadores analógicos de 16 canais, propiciando a aquisição de dados de 32 sensores por módulo. Entretanto, com poucos ajustes no projeto do circuito eletrônico e pequeno aumento no custo de fabricação do circuito, facilmente poderiam ser utilizados 4 multiplexadores analógicos, e então, cada MAD permitiria a aquisição de dados de até 64 sensores. Alterações como esta precisam ser avaliados para cada caso. Deve-se lembrar também que existe uma diversidade muito grande na família de microcontroladores da Microchip® com arquitetura 16-bit, que poderiam ser analisados para uso em aplicações maiores.

Para os MCA-II, a questão de dimensões de cada módulo, assim como o número de atuadores que podem ser controlados por cada módulo, também constitui uma questão a ser analisada para cada aplicação. Na família de microcontroladores PIC18F da Microchip®,

existem modelos que dispõe desde 15 até 70 pinos I/Os, que poderiam ser utilizados para acionamento de atuadores a partir de um único módulo. Além disso, em aplicações que necessitem o controle de muitos atuadores (>100), o emprego dos Sub-Módulos de Seleção (SMS) no MCA-II passa a se tornar pouco útil, frente ao número de interruptores a serem acionados manualmente no caso de falha do computador central e do aplicativo supervisor, e portanto, este sub-módulo apenas encarece o sistema eletrônico de controle.

Ainda sobre o MCA-II, verificou-se ao final da pesquisa a possibilidade de otimizar um pouco mais as placas de circuito impresso. No MCA-II utilizaram-se mini-relês eletromecânicos com um contato reversível, sendo que estes poderiam ser perfeitamente substituídos por mini-relês eletromecânicos com um contato normalmente aberto, sob a justificativa destes serem menores. Além disso, verificou-se que o circuito integrado ULN2803 não foi utilizado da melhor forma possível tanto MCA-I quanto no MCA-II. Conforme mencionado ao longo da descrição deste trabalho, foram utilizados diodos, resistores e capacitores no circuito de acionamento de atuadores, com a finalidade de atenuar ou suprimir ruídos que de algum modo poderiam prejudicar a operação do circuito microprocessado. Todavia, o ULN2803 dispõe de diodo supressor integrado o que dispensaria o uso dos 3 componentes passivos recém mencionados. Foram efetuados testes em laboratório ao final da pesquisa avaliando esta modificação no esquema de ligação do ULN2803, sendo que o circuito microprocessado operou normalmente sem o uso de diodos, resistores e capacitores e, portanto, estes são dispensáveis.

A adoção de uma arquitetura baseada em sistemas de controle centralizados e o uso do padrão de comunicação RS232, apesar de serem fundamentais para facilitar a realização de testes e permitir a compreensão de inúmeras dificuldades atreladas ao desenvolvimento de um sistema como o descrito neste trabalho, sem dúvidas constituem fatores limitantes para a escalabilidade do sistema. Em aplicações maiores ou com dispositivos instalados distantes entre si e do painel central, a quantidade de cabos requerida pode ser muito grande, o que acarretará alto custo e dificuldades para eventuais operações de reparo ou manutenção. Baseado nesta análise entende-se que, mesmo havendo a possibilidade de projetar módulos com maior disponibilidade de recursos de hardware para aquisição de dados de mais sensores ou controle de mais atuadores, isto provavelmente não seria viável frente às limitações de cabeamento comentadas.

Deve-se efetuar um esforço em trabalhos futuros para substituir o padrão RS232 pelo RS485 ou por tecnologias de transmissão de dados sem-fio, sob justificativa e argumentação

já apresentada neste trabalho. Tal substituição permitiria a intercomunicação de módulos e computador a distâncias maiores e permitiria a instalação de módulos distribuídos ao longo da área de interesse. Com esta modificação certamente haveria redução significativa na quantidade de cabos requeridos na área e maior facilidade para instalação e manutenção do sistema (TORRE-NETO et al., 2000). Nesta condição, talvez seria interessante elaborar módulos mistos a exemplo do trabalho de Coates et al. (2006a), ou seja, com recursos tanto para aquisição de dados quanto para controle de atuadores, a fim de que sensores e atuadores instalados próximos a determinado módulo, fossem coordenados por este único módulo.

Outros módulos podem ser projetados para aquisição de dados de outros tipos de sensores ou para outras finalidades, de modo que a concepção de comunicação entre módulos e computador empregada no presente trabalho se aplica a outras situações.

Crítérios de manejo da irrigação não abordados neste trabalho podem ser implementados no aplicativo supervisorio, a fim de atender a aplicações mais específicas. Acerca desta pesquisa, provavelmente o aplicativo supervisorio constitui o item que dispõe de mais “espaço” para realização de contribuições e aprimoramentos. Este aplicativo, junto com o computador central, é responsável pelo controle de todas as operações executadas pela rede de módulos. Portanto, uma vez que o aplicativo supervisorio disponha das funcionalidades necessárias, pouco importa a complexidade das estratégias ou critérios de manejo da irrigação requeridos pela aplicação.

O desenvolvimento do sistema proposto envolveu o emprego de conhecimentos de irrigação, eletrônica, programação e automação, sendo que dificuldades, problemas e desafios relacionados a estas áreas ocorreram simultaneamente durante a execução desta pesquisa.

5 CONCLUSÃO

O circuito eletrônico projetado para os módulos foi capaz de atender as necessidades dos experimentos avaliados nesta pesquisa. O aplicativo supervisor dispõe de uma interface de fácil compreensão e apresentou-se como uma ferramenta essencial para facilitar o acompanhamento e interferência nas tarefas executadas pelos módulos.

A solução de automação apresentada operou adequadamente durante o período avaliado, que foi de 4 a 8 meses, de acordo com cada experimento. O sistema automático foi capaz de controlar a irrigação com base na leitura de tensiômetros, bem como de minilísímetros.

O modelo baseado em sistemas de controle centralizados, adotado para elaboração da rede de módulos foi adequado para as aplicações descritas, entretanto, este modelo atrelado ao uso do padrão de comunicação RS232 constitui uma limitação para a escalabilidade do sistema proposto. Por outro lado, nas etapas de avaliação a campo demonstrou-se a versatilidade e confiabilidade do sistema.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P.E.P.; DURÃES, F.O.M. **Uso e manejo da irrigação**. Brasília: Embrapa, 2008. 528 p.

AYARS, J.E.; PHENE, C.J. Automation. In: LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production: design, operation, and management**. Amsterdam: Elsevier, 2007. chap. 7, p. 259-284.

BEESON JR., R. C. Weighing lysimeter systems for quantifying water use and studies of controlled water stress for crops grown in low bulk density substrates. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 98, n. 6, p. 967-976, Apr. 2011.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 672 p.

BUCHTER, B.; HINZ, C.; WYDLER, H.; FLUHLER, H. Evaluation of temperature and bypass flow sensitivity of tensiometers in a field soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 87, p. 281-291, Jan. 1999.

CAMARGO, A.P.; PINTO, M.F.; RETTORE NETO, O.; DONADELLI, R.A.; BOTREL, T.A. Desenvolvimento e avaliação de manômetros digitais com rotina de auto-calibração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40., 2011, Cuiabá. **Anais...** Jaboticabal : SBEA, 2011. p. 1-8.

CAMPECHE, L.F.S.M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da cultura da lima ácida "Tahiti" (Citrus latifolia Tan)**. 2002. 67 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CARARO, D.C.; DUARTE, S.N. Injeção de CO₂ e lâminas de irrigação em tomateiro sob estufa. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 3, p. 432-437, set. 2002.

CARDENAS-LAILHACAR, B.; DUKES, M.D. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 666-672, Jan. 2010.

CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M.; CRUZ, F.A.; SOUZA, A.P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, maio/ago. 2007.

CASADESÚS, J.; MATA, M.; MARSAL, J.; GIRONA, J. A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 83, p. 11-20, Jan. 2012.

COATES, R.W.; DELWICHE, M.J.; BROWN, P.H. Control of individual microsprinkler and fault detection strategies. **Precision Agriculture**, Bedford, v. 7, n. 2, p. 85-99, Apr. 2006a.

_____. Design of a system for individual microsprinkler control. **Transactions of the ASABE**, Saint Joseph, v. 49, n. 6, p. 1963-1970, 2006b.

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

CULLER, D.; ESTRIN, D.; SRIVASTAVA, M. Overview of sensor networks. **IEEE Computer Society - Computer Magazine**, p. 41-49, Aug. 2004. Disponível em: < <http://compilers.cs.ucla.edu/emsoft05/CullerEstrinSrivastava04.pdf> >. Acesso em: 12 de julho de 2012.

DUGAS, W.A.; BLAND, W.L. The accuracy of evaporation measurements from small lysimeters. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 26, p. 119-129, Apr. 1989.

EVANS, R.; KIM, Y.; IVERSEN, W. Evaluation of closed-loop irrigation control with wireless sensor network. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2007, Minneapolis. **Proceedings...** Minneapolis: ASABE, 2007. p. 1-15.

FISHER, D.K. Automated collection of soil-moisture data with a low-cost microcontroller circuit. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 23, n. 4, p. 493-500, feb. 2007.

FISHER, D.K.; KEBEDE, H. A low-cost microcontroller-based system to monitor crop temperature and water status. **Computer and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 74, n. 1, p. 168-173, July 2010.

FOLEGATTI, M.V.; CASARINI, E.; BLANCO, F.F. Greenhouse irrigation water depths in relation to rose stem and bud qualities. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 465-468, July/Sept. 2001.

FRIZZONE, J.A.; TEODORO, R.E.F.; PEREIRA, A.S.; BOTREL, T.A. Lâminas de água e doses de nitrogênio na produção de aveia (*Avena sativa L.*) para forragem. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 52, n. 3, p. 578-586, Sept./Dec. 1995.

GOMIDE, R.L.; MAENO, P. Requerimento de água pelas culturas. In: ALBUQUERQUE, P.E.P.; DURÃES, F.O.M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. cap. 5, p. 225-253.

GRIMMOND, C.S.B.; ISARD, S.A.; BELDING, M.J. Development and evaluation of continuously weighting mini-lysimeters. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 62, p. 205-218, 1992.

HAMRITA, T.K.; HOFFACKER, E.C. Development of a smart wireless soil monitoring sensor prototype using RFID technology. **Applied Engineering in Agriculture**, St Joseph, v. 21, n. 1, p. 139-143, Jan. 2005.

KIM, Y.; EVANS, R. Software design for wireless sensor-based site-specific irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 66, p. 159-165, 2009.

KRON MEDIDORES. Conceitos básicos de RS-485 e RS-422. Disponível em: < www.kronweb.com.br/download2.php?id=353 >. Acesso em: 12 de julho de 2012.

LEÃO, R.A.; TEIXEIRA, A.S.; CANAFÍSTULA, F.J.F.; MESQUITA, P.E.G.; COELHO, S.L. Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para calibração de sensores de umidade do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 294-303, jan./ abr. 2007.

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

LIMA, C. J. G. S. **Calibração e manejo de extratores providos de cápsulas porosas e transdutores de pressão para monitoramento de íons na fertirrigação**. 2009. 109 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

LOUREIRO, A.; NOGUEIRA, J.; RUIZ, L.; MINI, R.; NAKAMURA, E.; FIGUEIREDO, C. Redes de sensores sem fio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES, 21., 2003, Natal. **Anais...** Natal: SBRC, 2003. p. 179-226.

MACHADO, F.N.R.; ABREU, M.P. **Projeto de banco de dados: uma visão prática**. 11. ed. São Paulo: Érica, 2004. 299 p.

MACKAY, S.; WRIGHT, E.; REYNDERS, D.; PARK, J. **Practical industrial data networks: design, installation and troubleshooting**. Oxford: Elsevier, 2004. 421 p.

MATESE, A.; Di GENARO, S.F.; ZALDEI, A.; GENESIO, L.; VACCARI, F.P. A wireless sensor network for precision viticulture: the NAV system. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 69, n. 1, p. 51-58, 2009.

MIRANDA, F.R. **A site-specific irrigation control system**. St. Joseph, ASAE, 2003. p. 2-11 (ASAE Paper, 031129). Disponível em: <<http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=5&AID=13740&CID=lnv2003&T=2>>. Acesso em: 12 de julho de 2012.

MIRANDA, F.R.; YODER, R.E.; WILKERSON, J.B.; ODHIAMBO, L.O. An autonomous controller for site-specific management of fixed irrigation systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 48, n. 3, p. 183-197, Apr. 2005.

MISRA, R.K.; PADHI, J.; PAYERO, J.O. A calibration procedure for load cells to improve accuracy of mini-lysimeters in monitoring evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 406, p. 113-118, 2011.

MORAIS, R.; FERNANDES, M.A.; MATOS, S.G.; SERÓDIO, C.; FERREIRA, P.J.; REIS, M.J. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 62, n. 2, p. 94-106, 2008.

PARK, J.; MACKAY, S.; WRIGHT, E. **Practical data communications for instrumentation and control**. Oxford: Elsevier, 2003. 389 p.

QUEIROZ, T.M. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. 2007. 141 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

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

RIQUELME, J.A.; SOTO, F.; SUARDIAZ, J.; SANCHEZ, P.; IBORRA, A.; VERA, J.A. Wireless sensor networks for precision horticulture in Southern Spain. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 68, n. 1, p. 25-35, 2009.

SILVEIRA, L.R. **Sistema de aquisição de dados utilizando telemetria: aplicação em secador solar de produtos agrícolas**. 2011. 106 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

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

TORRE-NETO, A.; SCHULLER, J.K.; HAMAN, D.Z. **Networked sensing and valve actuation for spatially variable microsprinkler irrigation**. St. Joseph, ASAE, 2000. 17 p. (ASAE Paper, 001158).

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

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

VILELA, L.A.A.; GERVÁSIO, E.S.; SOCCOL, O.J.; BOTREL, T.A. Sistema para aquisição de dados de pressão e vazão usando microcomputador. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, Ponta Grossa, v. 1, n. 2, p. 25-30, 2001.

WANG, N.; ZHANG, N.; WANG, M. Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 50, p. 1-14, Feb. 2006.

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

WILLIAMS, T.H.L. An automatic scanning and recording tensiometer system. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 39, p. 175-183, Mar. 1978.