

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
MESTRADO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**

WLISSSES MATOS MACIEL

**MONTAGEM E INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA DE
CONTROLE AUTOMÁTICO DE IRRIGAÇÃO**

Fortaleza – Ceará
Março de 2005

MONTAGEM E INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE IRRIGAÇÃO

WLISSES MATOS MACIEL
Engenheiro Agrônomo

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Agronomia, Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Renato Sílvio da Frota Ribeiro, Ph.D.

Fortaleza – Ceará
Março de 2005

Aos meus pais, Maciel e Vanda.

As irmãs, Karine e Harine.

MINHA GRATIDÃO
E
MINHA HOMENAGEM

DEDICO

M139m Maciel, Wlisses Matos

Montagem e instalação de um sistema de controle automático de irrigação / Wlisses Matos Maciel

86 f. il., color. enc.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

Orientador: Renato Silvio da Frota Ribeiro
Área de concentração: Irrigação e Drenagem

1. Sensores de umidade 2. Lógica Fuzzy 3. Irrigação – Automação
I. Ribeiro, Renato Silvio da Frota II. Universidade Federal do Ceará –
Mestrado em Agronomia III. Título

CDD 631

Esta dissertação foi submetida a julgamento como parte dos requisitos necessários a obtenção do grau de Mestre em Agronomia – Área de concentração Irrigação e Drenagem, outorgada pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca de Ciências e Tecnologia da referida Universidade.

A citação de qualquer trecho dessa dissertação é permitida, desde que seja da uniformidade com as normas da ética científica.

Wlisses Matos Maciel

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 23/03/2005

Prof. Renato Sílvio da Frota Ribeiro, Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Thales Vinícius de Araújo Viana, Dr. (Conselheiro)
Universidade Federal do Ceará – UFC

Fábio Rodrigues de Miranda, Ph.D. (Conselheiro)
Embrapa – Agroindústria Tropical

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais Manuel João Maciel e Vanda Matos Maciel pelo esforço, confiança, dedicação e carinho.

Minhas irmãs Karine Matos Maciel e Harine Matos Maciel pela ajudas nos momentos difíceis.

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade concedida.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de estudo que contribuiu largamente para a conclusão do curso.

Ao Prof. Renato Silvio da Frota Ribeiro, pela orientação, sugestões, apoio e a amizade durante todo o curso.

Ao Fábio Rodrigues de Miranda da EMBRAPA, pelas sugestões para a melhoria deste trabalho.

Ao Prof. Thales Vinícius de Araújo Viana, pelas sugestões oferecidas, e a amizade durante todo o curso.

Aos demais professores do CMID pelos ensinamentos, colaboração e apoio.

Aos colegas do curso, pela calorosa amizade e pela convivência sadia e construtiva.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo apoio.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão com sucesso deste trabalho, meu muito obrigado.

“A leitura torna o homem completo; a conversação torna-o ágil; o escrever dá-lhe precisão.”

(Francis Bacon).

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
RESUMO.....	12
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1. Automação e eletrônica.....	16
2.2. Sensores de umidade do solo.....	19
2.3. Sensores de temperatura.....	23
2.4. Microprocessadores.....	25
2.5. Sistemas de aquisição de dados.....	26
2.6. Controle de sistemas de irrigação.....	28
3. MATERIAIS E METODOLOGIA.....	30
3.1. Sistema automático inteligente.....	32
3.1.1. Componentes do sistema eletrônico.....	34
3.2. Sistema automático convencional.....	39
3.3. Sistema não automático.....	40
3.4. Sistema de irrigação do projeto.....	41
3.5. Sistema de lógica fuzzy projetado.....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1. Resultado da cultura.....	51
4.2. Análise estatística.....	51
4.3. Teste de vazão.....	53
4.4. Análise da evpotranspiração, das curvas de kc e da lâmina e volumes acumulados dos sistemas não automático e automático por temporizador.....	54
4. CONCLUSÕES.....	59
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
6. ANEXOS.....	67

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Visão geral da área do trabalho no LHI - UFC.....	30
Figura 2. Visão dos tratamentos distribuídos na área no LHI - UFC (detalhe do tratamento).....	31
Figura 3. Distribuição dos tratamentos na área de forma aleatória (Controle automático inteligente (3); controle automático por temporizador (2); e controle não automático (1)).....	32
Figura 4. Instalação dos sensores no campo.....	33
Figura 5. Sensores no campo. (30 cm e 15 cm).....	33
Figura 6 Datalogger CR23X e Multiplexador utilizado no trabalho.....	35
Figura 7. Computador utilizado no trabalho.....	35
Figura 8. Visão geral da placa E/S modelo CIO-DIO24, rack e contactor.....	36
Figura 9. Visão geral dos cabos para a ligação dos sensores de umidade.....	37
Figura 10. Visão geral dos sensores de umidade em saturação.....	37
Figura 11. Termopares tipo T (cobre e constantan) utilizados no experimento.....	38
Figura 12. Sensores de temperatura prontos para serem instalados no campo.....	38
Figura 13. Instrumentos utilizados para a instalação dos sensores de umidade e temperatura do solo.....	39
Figura 14. Visão geral do temporizados (time) formado por um contactor e um programador.....	40
Figura 15. Chave de partida utilizada no tratamento não automático.....	41
Figura 16. Linha lateral de gotejadores (Naan TIF 16 mm).....	42
Figura 17. Cabeçal de controle do sistema.....	43
Figura 18. Bomba utilizada nos sistemas de irrigação.....	43
Figura 19. Caixa d' água utilizada no trabalho para cada tratamento.....	44
Figura 20. Detalhe das três caixas do experimento.....	44

Figura 21. Distribuição das produtividades nas unidades experimentais.....	52
Figura 22. Variação da evapotranspiração de referência ao longo do ciclo do melão.....	55
Figura 23. Variação da evapotranspiração da cultura ao longo do ciclo do melão.....	56
Figura 24. Variação do coeficiente de cultivo ao longo do ciclo do melão.....	56
Figura 25. Variação da lâmina bruta ao longo do ciclo do melão.....	57
Figura 26. Variação do volume acumulado aplicado ao longo do ciclo do melão.....	57
Figura 27. Variação do tempo de operação do sistema ao longo do ciclo do melão.....	58
Figura 28. Curva característica da água no solo nas profundidades 10, 30 e 50 cm no Laboratório de Hidráulica e Irrigação.....	59

LISTA DE TABELAS

	Pág
Tabela 1. Características técnicas da bomba Anauger 700 (a).....	42
Tabela 2. Resultado da análise de água para irrigação.....	45
Tabela 3. Valores máximos e mínimos dos parâmetros de entrada e saída difuso.....	46
Tabela 4. Valores dos conjuntos difuso de entrada.....	47
Tabela 5. Valores dos conjuntos difuso de saída.....	48
Tabela 6. Quadro de análise de variância.....	52
Tabela 7. Fases da cultura com suas respectivas durações e valores de evapotranspiração de referência (Eto) dos tratamentos não automático e automático por temporizador (timer).....	54
Tabela 8. Fases da cultura com suas respectivas durações e valores de evapotranspiração da cultura (Etc) dos tratamentos não automático e automático por temporizador (timer).....	55
Tabela 9. Características físicas do solo da área experimental.....	68
Tabela 10. Características químicas do solo da área experimental.....	68
Tabela 11. Parâmetros da equação de van Genuchten e densidades do solo.....	69
Tabela 12. Características técnica dos tubos gotejadores.....	70
Tabela 13. Características técnica dos tubos gotejadores (vazão x pressão).....	70
Tabela 14. Dados Climatológicos de Fortaleza-Ce (1966 – 1999) Latitude: 3°44'S; Altitude: 20m Longitude: 38°33'W.....	71
Tabela 15. Características técnicas da bomba Anauger 700 (b).....	71
Tabela 16. Manejo da irrigação do tratamento não automático.....	72
Tabela 17. Manejo da irrigação do tratamento automático por temporizador.....	74

MONTAGEM E INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE IRRIGAÇÃO

Autor: Wlisses Matos Maciel

Orientador: Prof. Dr. Renato Sílvio da Frota Ribeiro

RESUMO

Este trabalho teve como objetivos montar e instalar sistemas de irrigação com diferentes níveis de automação: automático inteligente, automático por temporizador e não automático. Foi conduzido um experimento na área experimental do Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza, CE, no período de outubro de 2004 a janeiro de 2005. Esses três sistemas foram distribuídos em um delineamento estatístico em blocos casualizados. O delineamento constou de 6 blocos e três tratamentos distribuídos em 18 parcelas experimentais medindo 4m de largura e 12m de comprimento, ocupando uma área total de 1600m². A montagem foi dividida em duas fases, a primeira fase consistiu na montagem dos sistemas eletrônico e elétrico composto por sensores de umidade (blocos de resistência), sensores de temperatura (termopares), datalogger, multiplexador, placa digital de E/S padrão ISA, placa condicionadora de relés, temporizador, contactores, relés, chave de partida, cabeamento, aterramento e a segunda dos sistemas hidráulico e de irrigação composto de bombas, tubulações, reservatórios, manômetros, hidrômetros, venturis, tomadas de pressão e conexões; todos os sistemas preconizados foram montados e instalado no campo.

ASSEMBLY AND INSTALLATION OF A SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF IRRIGATION

Autor: Wlisses Matos Maciel

Orientador: Prof. Dr. Renato Sílvia da Frota Ribeiro

ABSTRACT

This work had as objectives to set up and to install overhead irrigations with different automation levels: automatic intelligent, automatic for temporizador and no automatic. An experiment was driven in the experimental area of the Laboratory of Hydraulics and Irrigation of the Federal University of Ceará, in Fortaleza, CE, in the period of October of 2004 to January of 2005. Those three systems were distributed in a statistical delineamento in blocks casualizados. The delineamento consisted of 6 blocks and three treatments distributed in 18 experimental portions measuring 4m of width and 12m of length, occupying a total area of 1600m². The assembly was divided in two phases, the first phase consisted of the assembly of the electronic and electric systems composed for sensor of humidity (resistance blocks), sensor of temperature (termopares), datalogger, multiplexador, digital plate of E/S pattern ISA, conditioning plate of relés, temporizador, contactores, relés, departure key, cabeamento, aterramento and Monday of the waterworks and of irrigation composed of bombs, piping, reservoirs, manômetros, hydrometers, venturis, pressure sockets and connections; all of the extolled systems were mounted and installed in the field.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura através da irrigação responde pelo consumo de 70% de toda a água doce no planeta, cujas fontes são de aproximadamente 1% de toda a água existente na Terra. Existe, portanto, uma necessidade de se utilizar mais racionalmente esse recurso escasso e de vital importância.

A agricultura irrigada, assim como as demais atividades do meio rural, necessita acompanhar os avanços tecnológicos. Nas últimas décadas, os aparelhos eletrônicos e os computadores estão num crescente avanço tecnológico, tornando-se mais baratos, precisos e com melhor interface com o usuário.

O computador pessoal é um equipamento de uso bastante difundido, podendo ser utilizado como um controlador de irrigação, comandar válvulas solenóides, acionar bombas, além de armazenar dados; isto tudo através de portas de comunicação externas. A grande vantagem na utilização do computador pessoal é a personalização das atividades, ou seja, o usuário pode elaborar um programa computacional que atenda às suas necessidades específicas. As vantagens de um equipamento automático em relação ao operador humano são em geral: assiduidade, rapidez, precisão e custo; sua desvantagem é a incapacidade para reagir a perturbações e a acidentes, além daqueles previstos em seu projeto.

Uma das maneiras para se obter uma irrigação eficiente e maximizar a produção envolve a automação do sistema, para a determinação de quando e quanto irrigar, através do uso de tecnologias de sensores, comunicação, processamento de dados e dispositivos de atuação. Mais recentemente, a aplicação de tecnologias inteligentes, como sistemas especialistas, lógica fuzzy e redes neurais artificiais estão abrindo uma nova perspectiva na obtenção de uma maior precisão em irrigação.

O presente trabalho teve como principal objetivo a montagem e a instalação de sistemas de controle de irrigação com níveis diferentes de automação, definidos como: não automático; automático por temporizador (timer);

e automático inteligente. De forma secundária, foi planejado também um experimento para a comparação dos sistemas mencionados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Automação e eletrônica

Para que um país possa se desenvolver em termos de produtividade, é necessária a utilização de tecnologias que diminuam o requerimento de mão-de-obra por unidade de área. Essa redução deve ocorrer naturalmente quando o setor urbano-industrial é capaz de absorver a mão-de-obra excedente. Nos países em desenvolvimento, a força de trabalho agrícola costuma aumentar mais rapidamente que a demanda do setor não-agrícola por esse fator. Por outro lado, o aumento da produtividade da mão-de-obra agrícola pode ser alcançado com investimentos em educação e inovações tecnológicas que permitam utilizar com maior eficiência os fatores convencionais, terra e trabalho (FREIRE, 2000).

Com a grande utilização da informática nos dias de hoje, há uma crescente utilização de sistemas informatizados no manejo da irrigação. Sistemas de irrigação computadorizados foram desenvolvidos por Cahoon et al. (1990), Phene et al. (1992), e Zazueta et al. (1994).

Grande parte das inovações tecnológicas tem como princípios básicos dispositivos eletrônicos. Ao longo dos últimos anos, a eletrônica vem passando por uma evolução extremamente rápida, ocupando uma posição de destaque entre todas as outras tecnologias (BRAGA, 1999).

A eletrônica tem um papel fundamental na modernização das atividades agrárias, a qual possibilita a automação dos equipamentos, tornando as atividades mais rápidas e precisas. A automação de processos tem sido neste século, uma tecnologia de profunda repercussão, cuja importância provém não só de substituir o trabalho humano nas tarefas monótonas e/ou cansativas, mas também, e principalmente, do fato de permitir sensível melhoria na qualidade dos processos, com pequena elevação no custo do equipamento (CASTRUCCI, 1969).

Todo sistema automático necessita de uma central de controle, na qual está armazenada a programação que comanda todas as funções do equipamento. Uma central de controle de fácil acesso e baixo custo é o computador pessoal, que é capaz de comandar equipamentos enviando sinais através das portas de

comunicação da CPU (SOUZA, 2001).

A comunicação é feita com o meio externo através de dispositivos acessados pela CPU, com endereçamentos (portas). Um PC geralmente possui como configuração básica dois tipos de portas: a) Paralela: usada principalmente por periféricos de acesso local que exigem maior capacidade de tráfego de informações, como impressoras e scanners; b) Serial: usada principalmente por periféricos de acesso a longas distâncias (via linha telefônica/ MODEM), ou dispositivos que exigem menor tráfego de informações, como é o caso do mouse (VILELA, 1999).

Os sistemas de automação têm grande potencial de uso na agropecuária e são utilizados na agricultura e na zootecnia de precisão para automatizar processos, monitorar melhor os sistemas, otimizar a produção e reduzir perdas (SILVA, 1998).

Segundo Gornat e Silva (1990), a automatização do sistema de irrigação apresenta as seguintes vantagens:

- a) Melhor administração da propriedade ou projeto agrícola: controle centralizado, tomada de decisão automática, monitoração ou supervisão da operação do sistema, obtenção do histórico completo das aplicações de água e fertilizantes;
- b) Obtenção de maiores produtividades a um menor custo: controle preciso do tempo de aplicação da irrigação, irrigações sob condições ótimas, medições precisas das quantidades de água e fertilizante;
- c) Economia de mão-de-obra: abertura e fechamento automático de válvulas e registros, operação automática de bombas de recalque e de reforço;
- d) Economia de água;
- e) Economia de energia;
- f) Economia de fertilizante: quantidades administradas de forma precisas, solução balanceada apropriadamente.

Um sistema automático bem elaborado pode responder às situações de adversidade de forma inteligente, evitando que o problema se agrave. Em último caso, um sistema de alarme pode ser acionado para chamar a atenção do produtor para possíveis problemas. Mesmo que o produtor esteja ausente da

propriedade, é possível, por exemplo, que um sistema mais sofisticado disque para um aparelho de telefone automaticamente e anuncie uma das mensagens pré-definidas, alertando ao produtor ou ao responsável de plantão a respeito do tipo de ocorrência (FIALHO, 1999). Além disso, a automação permite monitorar e controlar o fundamento de um sistema físico de forma segura, rápida e automática. Este controle visa monitorar tarefas rotineiras, reagindo a certas características previsíveis do ambiente (SILVA 2000).

Existem inúmeros exemplos de sistemas de automação de aquisição de dados com os mais variados graus de complexidade, como a aplicação de lógica fuzzy e redes neurais para controlar um sistema de irrigação automático (RIBEIRO e YODER, 1997; RIBEIRO 1998; RIBEIRO et al, 2000). Todos eles, entretanto, têm alguns pontos em comuns que os caracterizam. Na maioria dos casos, também é necessário pelo menos um controlador inteligente e possivelmente um meio pelo qual diferentes unidades do sistema possam se comunicar entre si, e com o meio externo (FIALHO, 1999).

O monitoramento automático para manejo de irrigação, embora ainda incipiente no Brasil, constitui uma ferramenta importante no controle das aplicações de água para as plantas, e uma maior eficiência do seu uso, assegurando a sustentabilidade do sistema agrícola irrigado, e a preservação do meio ambiente. Nos sistemas de irrigação em jardins é comum à adoção de controle automático da irrigação com o uso do temporizador eletrônico, equipamento que promove a abertura ou o acionamento de motobombas e válvulas em períodos de tempo pré-determinados. Entretanto, esses equipamentos não levam em consideração o teor de água do solo ou outra variável do sistema solo-planta-atmosfera. Existem comercialmente no mercado sistemas automáticos que utilizam o tensiômetro, porém em pequena escala. O desenvolvimento dessa metodologia constitui uma linha de pesquisa e extensão, no sentido de sempre contribuir para o advento de equipamentos eficientes no controle de irrigação com baixo custo e acessível a agricultores (CARVALHO et al. 2001).

As coletas de dados meteorológicos até pouco tempo eram realizadas através de instrumentos meteorológicos convencionais. Recentemente, passou-se a se utilizar os sistemas automáticos de coleta de dados meteorológicos. Esses sistemas medem e registram os valores das diversas variáveis meteorológicas, de acordo com o intervalo programado de forma precisa.

Com a crescente utilização de estações meteorológicas automáticas é possível calcular a evapotranspiração para pequenos intervalos de tempo. Tipicamente, as seguintes variáveis climáticas são medidas por sensores específicos numa estação meteorológica automática: (1) radiação solar, medida por piranômetro; (2) temperatura do ar, medida por um termistor; (3) umidade relativa, medida por capacitor de película fina, (4) velocidade do vento, medida por anemômetro de conchas; (5) direção do vento, medido por um potenciômetro; e (6) precipitação, medida por um pluviômetro basculante. Os sensores são conectados a um datalogger e medidos a intervalos de tempo pré-estabelecido pela programação para o cálculo médio dos dados coletados. Os dados armazenados na memória do datalogger são normalmente transferidos manual ou automaticamente para uma central que irá processar os dados brutos coletados (PHENE et al. 1990; CAMPBELL, 1992).

Um sistema de aquisição de dados tal como os utilizados nas estações meteorológicas automáticas constitui-se de: canais de ligação (locais nos quais são conectados os sensores), sistema de memórias (utilizadas no armazenamento do sistema operacional, do programa ativo e dos dados), entradas de alimentação do sistema (baterias e/ou painel solar e/ou rede elétrica) e portas seriais (para disponibilização dos dados observados).

2.2 Sensores de umidade do solo

O desenvolvimento de sensores para medição da umidade do solo vem seguindo critérios como: facilidade na instalação e operação, tendo como vantagens a amostragem não destrutiva do solo e possível instalação com sistemas eletrônicos de medidas e armazenamento dos dados, citando os tensiômetros, sonda de nêutrons, sensores do tipo resistência elétrica, sensores

de capacitância do solo, sensores de dissipação de calor e os sensores tipo TDR como os que mais satisfazem estes critérios (YODER et al. 1998).

A determinação da umidade do solo se constitui numa importante ferramenta nos estudos relacionados com o movimento da água no solo e com manejo da irrigação. Segundo Miranda e Pires (2001), existem diversos métodos para se determinar a umidade do solo, e a escolha do método a ser usado dependerá de suas limitações, seja por apresentar baixa precisão ou por ser trabalhoso e exigir equipamentos normalmente não disponíveis. Libardi (1999) comenta que todos os métodos apresentam limitações, ou ainda um elevado nível de complexidade. Os métodos são normalmente classificados como diretos, quando permitem determinar diretamente a umidade do solo; o principal método direto de determinação da umidade do solo é o método padrão da estufa (REICHARDT, 1987; BERNARDO, 1995; LIBARDI, 1999; MIRANDA e PIRES, 2001), e indiretos, quando permitem estimar a umidade a partir de medições de resistência elétrica, de potencial da água no solo, etc. Dentre os métodos indiretos para a determinação da umidade do solo, destaca-se o método da tensiometria, que utiliza um aparelho denominado tensiômetro que mede a tensão de água no solo. O tensiômetro apresenta a limitação de medir a tensão apenas na faixa de 0 a - 0,8 atm, quando a faixa de potencial de água no solo disponível à planta varia de 0 a -15 atm. Segundo Millar (1989), a maioria das culturas requer irrigações antes da água do solo atingir o potencial de - 0,70 atm na zona efetiva do sistema radicular. Olitta (1976) considera que uma vantagem do tensiômetro em relação a outros métodos é a possibilidade de determinação do estado de energia do solo.

A sonda de nêutrons foi desenvolvida nos anos 40, utilizada primeiramente em trabalhos técnicos e científicos na exploração de petróleo (SMITH et al. 1968; DAKER 1988; MIRANDA e PIRES 2001). Como o próprio nome indica, este método se baseia no princípio de que os nêutrons emitidos por uma fonte são moderados pela água na região próxima a esta fonte. Entende-se por moderação de nêutrons ao processo de redução de sua energia, passando de nêutrons rápidos para lentos ou moderados. Os átomos de hidrogênio da água têm uma habilidade de atenuar de maneira eficiente a energia cinética dos

nêutrons rápidos. As fontes mais comuns são uma mistura contendo berilo ou rádio sendo que a primeira é mais utilizada por apresentar menos perigo. O equipamento básico constitui-se de uma sonda como fonte de nêutrons rápidos, um detector de nêutrons moderados e um medidor portátil. Miranda e Pires (2001) ressaltam a limitação do uso do método próximo à superfície do solo.

A metodologia de uso do TDR foi desenvolvida, inicialmente, por Fellner-Feldegg (1969) citado por Miranda e Pires (2001). Esta técnica consiste em medir o tempo de percurso de um pulso eletromagnético ao longo de um caminho constituído por uma sonda, que pode apresentar uma ou mais hastes metálicas de comprimentos conhecidos, ligados por um cabo coaxial até o sensor TDR. Miranda e Pires (2001) explicam que os vários componentes do solo possuem constantes dielétricas bem distintas no que diz respeito a velocidade de propagação de uma onda de energia em uma haste paralela inserida ao solo.

A medição da resistência à passagem da corrente elétrica em um solo e sua correlação com o conteúdo de água foi investigada por vários pesquisadores (DAKER 1988). O processo consiste em enterrar dois eletrodos no solo, entre os quais faz-se passar uma corrente elétrica. A maior ou menor resistência é encontrada de forma indireta, com o auxílio da Lei de Ohm e uma Ponte de Wheatstone, baseado no fato de um solo úmido oferecer menor resistência à passagem da corrente do que um solo seco. Segundo Daker (1988), problemas de contato entre os eletrodos e o solo e a concentração de sais na solução do solo foram solucionados de forma prática por Bouyoucos e Mick (1940) que introduziram o uso de um pequeno bloco de gesso, no qual são inseridos os dois eletrodos, ligados a fios isolados para a conexão do aparelho medidor. Segundo Klar (1988), o equipamento é constituído basicamente de dois eletrodos inseridos em um bloco poroso, que pode ser de gesso, de nylon ou de fibra de vidro, com a utilização desses materiais conseguiu-se blocos muito sensíveis a baixos e altos teores de umidade com boa aderência no solo e com duração bem satisfatória, podendo chegar a cinco anos de uso, mesmo em solos muito úmidos. Os blocos são instalados em profundidades e locais apropriados e as medições são efetuadas pelo “Medidor de Umidade de Bouyoucos”, isto é, um medidor de

impedância de corrente alternada, em vez da contínua, que faz com que sejam eliminados os erros causados pela eletrólise e pela polarização no bloco e no solo (DAKER, 1988).

Segundo Yoder et al. (1998), a amplitude de determinação da umidade do solo pelo bloco de gesso correspondente a tensões entre 10 e 1500 kPa. Segundo o fabricante do sensor Watermark sua amplitude com relação à tensão do solo varia de 0 a 200 kPa.

Os sensores do tipo resistência elétrica tem algumas vantagens como: a não necessidade de manutenção periódica e principalmente a utilização em sistemas de irrigação automatizados (Miranda 2003).

Sensores de resistência elétrica são relativamente baratos e podem ser instalados em um sistema controlador e armazenador de dados (sistema de aquisição de dados). Estes dispositivos exigem prévia calibração para a utilização de sistemas automatizados. Thomson e Armstrong (1987), McClann et al. (1992) e Eldredge et al. (1993) apresentaram calibrações para o sensor de umidade do solo Watermark modelo 200. Thomson et al. (1996); Thomson e Armstrong (1987), McClann et al. (1992) compararam equações e mostraram que duas equações divergiram significativamente. Essas comparações indicaram que as diferenças entre as duas equações de calibração poderiam estar na diferença em métodos de excitação dos sensores. Estudos adicionais através de Thomson et al. (1996) revelaram que o sensor Watermark (modelo 200SS) seguiu a mesma curva de calibração de Thomson e Armstrong (1987). A equação pode ser escrita como:

$$S = -\frac{R}{0,474483 - 0,0138697T + 0,000147019T^2 - 0,01306R} \dots\dots\dots(1)$$

Onde:

S = o potencial de água no solo (kPa);

R = resistência do sensor (kΩ);

T = temperatura do solo (°C).

Shock et al. (1996) utilizaram mais de 1000 sensores Watermark modelo 200SS para obter a equação de calibração, a equação simplificada é:

$$S = -\frac{2,678 + 0,003892R}{1 - 0,01201T} \dots\dots\dots(2)$$

Onde:

S = o potencial de água no solo (kPa);

R = resistência do sensor (Ω);

T = temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$).

Bausch e Bernard (1996) compararam o potencial de água no solo a partir da resistência do sensor de umidade Watermark e da temperatura do solo, usando as equações 1 e 2, com o potencial de água no solo medido por tensiometria. Eles aceitaram a equação de Shock que mostrou melhores resultados do que os apresentados por Thomson e Armstrong.

2.3 Sensores de temperatura

A temperatura é uma das variáveis mais importantes medidas em atividades complexas. Os sensores ou elementos de medidas que empregamos geram algum sinal que depende de suas temperaturas. Na prática, nunca se mede real e diretamente a temperatura. Em medições de temperatura deve-se dar atenção especial aos erros ocasionados por interferências externas. As grandezas não-elétricas (temperatura) são de grande importância na automação de controles. As grandezas elétricas são as mais apropriadas para o processamento, transformação, transmissões de dados. A relação entre a grandeza não-elétrica medida e a saída dos dados devem ser sempre verificadas por meio de calibração, a calibração torna-se necessária devido ao fato de muitas vezes a medida em si ser apenas um estágio no processamento do dado obtido, como no caso de controles automáticos. O número elevado de dados a ser obtidos e a transmissão a distância das medidas requerem muitas vezes técnicas eletrônicas de automação. As medidas efetuadas a distância são transmitidas por ligação de

fios condutores ou, então, ondas eletromagnéticas. A escolha do sistema de transmissão depende da distância entre o ponto de medição e centro de medição e controle, a esse sistema é associado o tipo de sensor ou elemento de medida usado para medir a grandeza, e a forma para a qual deve ser traduzida a informação a ser transmitida. Podemos distinguir dois sistemas básicos usados em telemedição: o analógico e o digital.

Os fenômenos elétricos são suscetíveis à variação da temperatura, e esta dependência vem sendo aproveitada para determinar o estado termodinâmico. A escolha entre vários princípios, que podem ser aplicados à medida de temperatura, depende das limitações e custos que cada um oferece. Os termômetros podem ser de vários tipos como: termopares, termistores e resistência de platina.

Os termômetros de resistência consistem num sensor com um elemento que exhibe uma mudança em resistência com a mudança da temperatura. O sensor do termômetro de resistência é composto de um condutor metálico, ou semicondutor, cuja resistência elétrica R se modifica de acordo com a temperatura t . Para condutores metálicos, em faixa limitada de temperatura, é válida a relação expressa pela equação abaixo:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2) \dots\dots\dots(3)$$

Onde:

- R_0 é a resistência à temperatura de 0°C ;
- α é o coeficiente de temperatura do material;
- β é um coeficiente de correção do material.

Normalmente são empregados dois tipos de sensores: detector de resistência de temperatura (RTD) e termistores. Os RTD's são sensores formados de metais como: platina, níquel ou uma liga de cromo-níquel. Esses materiais exibem um coeficiente positivo de resistência e são usados nos RTD's por serem estáveis em leitura de temperatura por longos períodos. Os termistores são

termômetros fabricados com materiais semicondutores como: manganês, níquel e cobalto. Estes materiais exibem um coeficiente negativo de resistência. Em algumas aplicações de alta precisão o silício ou germânio são utilizados na confecção de termistores.

Termopar é o nome dado à combinação de dois fios de metais diferentes que tem a seguinte propriedade: quando eles são unidos para completar um circuito e uma das junções é mantida a uma temperatura mais alta que a da outra, uma corrente circula no circuito. Esse princípio é usado na medição da temperatura; uma junção é colocada no ponto onde a temperatura deve ser medida e a outra junção é colocada onde a temperatura é conhecida ou pode ser mantida em valor fixo. Os fenômenos elétricos são suscetíveis à variação da temperatura, e esta dependência vem sendo aproveitada para determinar o estado termodinâmico. A escolha entre vários princípios, que podem ser aplicados à medida de temperatura, depende das limitações e custos que cada um oferece. Os termopares são os termômetros de confecção mais simples. São do tipo analógico e podem ser conectados por ligação diferencial ou simples.

2.4 Microprocessadores

As circunstâncias que se nos deparam hoje no campo dos microcontroladores têm os seus primórdios no desenvolvimento da tecnologia dos circuitos integrados. Este desenvolvimento tornou possível armazenar centenas de milhares de transístores num único chip. Isso constituiu um pré-requisito para a produção de microprocessadores e, os primeiros computadores foram construídos adicionando periféricos externos tais como memória, linhas de entrada e saída, temporizadores e outros. Um crescente aumento do nível de integração, permitiu o aparecimento de circuitos integrados contendo simultaneamente processador e periféricos. Foi assim que o primeiro chip contendo um microcomputador e que mais tarde haveria de ser designado por microcontrolador, apareceu.

De eletrodomésticos a sistemas industriais, passando pelo computador pessoal e telefones celulares, em quase tudo que tocamos existe um microprocessador, ou um microcontrolador ou um processador digital de sinais.

O baixo custo dos microprocessadores fez com que os processos, antes controlados por componentes analógicos, passassem a ser controlados por sistemas digitais programáveis. Somam-se ao baixo custo outras vantagens dos sistemas digitais, como flexibilidade e confiabilidade.

Historicamente os primeiros protótipos de processadores destinados ao processamento digital de sinais datam das décadas de 60 e 70. Devido aos custos elevados suas aplicações foram limitadas a somente algumas aplicações críticas. Esforços pioneiros foram feitos em quatro áreas chaves: radar e sonar onde a segurança nacional estava em risco; exploração de petróleo onde poderiam ser feitas grandes fortunas; exploração espacial onde os dados devem ter uma grande precisão; e no processamento de imagens na área médica onde vidas poderiam ser salvas.

Atualmente existe uma enorme quantidade de processadores e a cada dia são lançados novos produtos no mercado. De um modo geral os processadores podem ser divididos em 3 classes principais: (a) microprocessadores; (b) microcontroladores e (c) PDS (processador digital de sinais).

A revolução do computador pessoal nos anos 80 e 90 causou uma explosão de novas aplicações utilizando processadores digitais de sinais. Atualmente os PDS's são empregados em um grande número de dispositivos eletrônicos, mas destacam-se em algumas aplicações mais comuns: telecomunicações, processamento de áudio, processamento de imagens e instrumentação e controle.

2.5 Sistema de aquisição de dados

Os sentidos humanos convivem com sinais analógicos - som, luz, temperatura, pressão, mas para um computador digital, concebido para operar com sinais digitais, a manipulação direta destes sinais não é possível. Um sinal digital é representado por uma seqüência de dígitos 1 e 0 que pode ser uma representação numérica do sinal analógico após um processo de conversão A/D (analógico-digital). Um sinal digital pode ser facilmente manipulado por um

computador, e se necessário, convertido em sinais analógicos por um conversor D/A (digital-analógico). A esta manipulação de sinais designamos processamento digital de sinais, que envolve métodos de processamento de sinais representados por uma seqüência de números, usando técnicas matemáticas para transformação ou análise dos mesmos.

Outra característica dos sentidos humanos é o processamento em tempo real, ou seja, a capacidade de rápida interpretação dos sinais analógicos. A capacidade de processamento em tempo real requer processadores otimizados para executar algoritmos comuns em processamento digital de sinais. Estes processadores recebem a denominação genérica processador digital de sinais.

Um sistema de aquisição de dados envolve um programa para a leitura de sinais com o uso de microcomputadores. Através de conversores A/D, sinais de tensão elétrica são digitalizados, sendo assim lidos no computador. Estes sinais de tensão elétrica podem ser gerados por uma grande variedade de sensores, e através de uma conversão adequada, a grandeza de interesse pode ser lida diretamente no programa. Por exemplo, com termopares tipo K, o programa adquire o sinal de tensão (milivolts) e apresenta diretamente o resultado em temperatura ($^{\circ}\text{C}$). É possível adquirir e processar sinais de temperatura, eletromiografia; voz; força, citando apenas as principais aplicações.

O aumento da capacidade de processamento aliada à melhoria dos sistemas operacionais e linguagens de programação, propiciou o surgimento de uma grande variedade de programas capazes de trabalhar com a matemática avançada. Com isto, o trabalho de análise e interpretação de resultados, cujo início era a prancheta de anotações passou a ser executado de forma integrada ao processo de medição. Outras funções, normalmente efetuadas por circuitos analógicos como condicionamento de sinais, controle de processos, modelagem matemática de sistemas passaram a ser executadas em sistemas digitais.

Existe uma gama considerável de opções de sistemas de aquisição de dados. A escolha do sistema adequado depende essencialmente do tipo de grandeza a ser medida e do objetivo da medida. Com base nestes dois parâmetros é possível definir características como: velocidade da medição,

número de grandezas distintas, exatidão e a configuração do sistema, determinando os tipos componentes utilizados.

Os dataloggers são equipamentos que conectados ao computador permitem a medição de uma ou mais grandezas. A diferença de um datalogger para um instrumento de medição está em sua construção mais simples. Geralmente os dataloggers são construídos com várias entradas de tensão, exigindo que o sinal gerado pelo sensor seja adaptado às condições destas entradas.

As placas de aquisição de dados possuem função similar aos dataloggers, a digitalização de valores de tensão e transferência dos valores binários para o computador. A principal diferença é que as placas são ligadas diretamente aos barramentos internos do computador, conferindo uma maior velocidade na troca de dados. Desta forma, a placa de aquisição de dados possui as mesmas condições de acesso de outros componentes do sistema como controladores de vídeo, memória, disco, etc. Além da digitalização de tensões, é prática comum entre os fabricantes, incluírem outras funções nestas placas, tais como: saída de sinais analógicos (conversão de digital para analógico), entradas e saídas digitais paralelas, temporizadores e contadores.

2.6 Controle de sistemas de irrigação

O objetivo de qualquer sistema de controle é regular alguma variável dinâmica de um processo. Sistemas de controle de irrigação devem controlar o fluxo de água para as culturas, de modo a se maximizar a produção com otimização do consumo de água e energia.

Os vários sistemas de controles podem ser classificados segundo Duke et al. (1990), como: (1) hidráulico, (2) mecânico, (3) eletromecânico, (4) eletrônico, e (5) controle computadorizado. Os sistemas automatizados de irrigação têm inúmeras vantagens: atuação em tempo real, redução de custos em mão de obra, manutenção da cultura sempre em níveis de tensão da capacidade de campo (EVETT et al. 1996). Um sistema de controle avançado deve interagir com o ambiente tendo dispositivos para sentir mudanças no mesmo, tendo uma

comunicação e um processamento de dados em tempo real, baseado em algoritmos e sem a intervenção humana (RIBEIRO, 1998).

Benami e Offen (1984) declararam que um alto nível de automação foi alcançado quando válvulas hidráulicas foram ativadas eletronicamente no campo. Os principais modos de controle são: (1) controle liga-desliga, (2) controle em níveis, e (3) controle contínuo (PHENE, 1986).

Nos últimos anos vários pesquisadores desenvolveram sistemas de controle automatizado. Fangmeier et al. (1990) desenvolveu um sistema de controle automático baseado na temperatura com termômetro de infravermelho, psicrometro aspirado e blocos de resistência elétrica. Phene et al. (1992) usaram um sistema de evaporação de tanque automatizado para o controle em tempo real de um sistema de irrigação por gotejamento. Ribeiro (1998) testou um sistema inteligente de controle de irrigação utilizando lógica fuzzy e redes neurais, artificiais. Um controlador de baixo custo foi desenvolvido por Miranda (2003), que implementou um sistema de grau de prioridades para manter a umidade na zona das raízes.

Muitos estudos foram realizados ao longo do tempo, com a utilização de sensores de umidade do solo para o manejo da irrigação, por Phene et al. (1973), Phene e Howell (1984), e Phene (1989). Sensores de umidade do solo foram utilizados para manter a umidade na zona das raízes próxima à capacidade de campo, e concluíram que a eficiência do controle depende de quatro fatores: (1) adequada operação do “hardware” de controle; (2), o algoritmo apropriado para o sistema; (3) sensor de umidade confiável; e (4) adequada operação das válvulas solenóide, reguladores de pressão, medidores de vazão, e sistema de filtragem.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

O trabalho de montagem foi conduzido na área experimental do Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, localizado no Município de Fortaleza – CE. Os equipamentos e instrumentos de aquisição de dados e controle foram instalados no galpão do Laboratório e os sensores e demais equipamentos do sistema de irrigação em área externa contígua de 40m x 40 m.

Três sistemas de controle foram definidos para a realização de testes e experimentos com relação ao nível de automação aplicado: controle automático inteligente, controle automático convencional, utilizando-se um temporizador e controle não automático. Esses três sistemas foram distribuídos em um delineamento estatístico em blocos casualizados. O delineamento constou de 6 blocos e três tratamentos distribuídos em 18 parcelas experimentais medindo 4m de largura e 12m de comprimento, ocupando uma área total de 1600m² (Figura 1).



Figura 1. Visão geral da área do trabalho no LHI - UFC.

A parcela experimental foi constituída por três linhas de 12m de comprimento espaçadas entre si de 2m, com um espaçamento entre plantas de 0,5m (Figuras 2 e 3). A distribuição espacial das parcelas foi obtida utilizando-se o aplicativo Matlab com o desenvolvimento de uma matriz 6 x 3 de números aleatórios.



Figura 2. Visão dos tratamentos distribuídos na área no LHI - UFC (detalhe do tratamento).

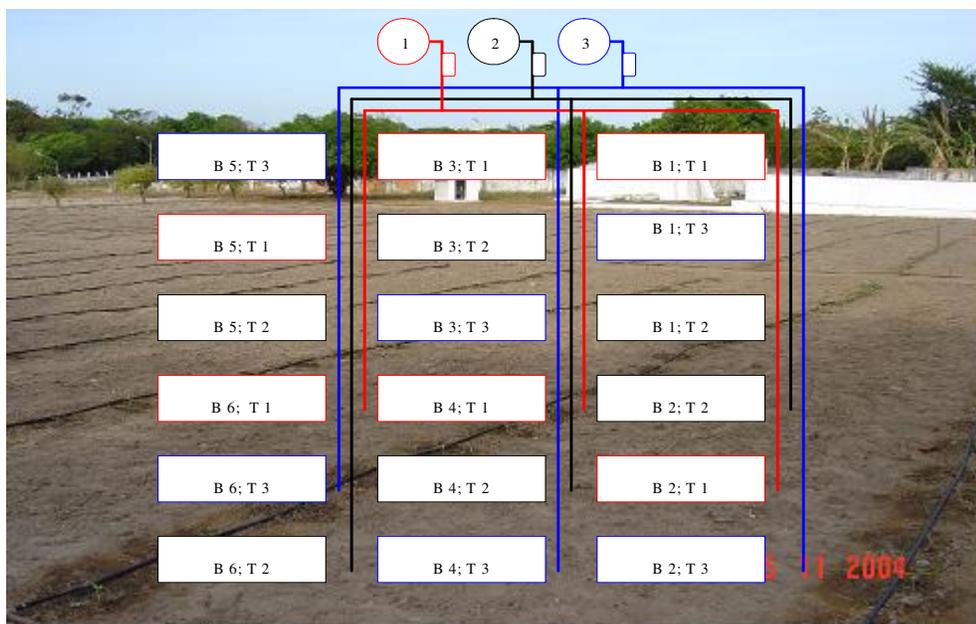


Figura 3. Distribuição dos tratamentos na área de forma aleatória (Controle automático inteligente (3); controle automático por temporizador (2); e controle não automático (1)).

3.1 Sistema automático inteligente

O sistema automático inteligente foi instalado com 18 sensores de umidade do solo do tipo blocos de resistência elétrica Watermark model 200SS (IRROMETER Co., Riverside, CA, E.U.A.), localizados em nove unidades experimentais nas profundidades de 15cm e 30cm, e 18 sensores de temperatura do tipo termopar de cobre e constantan (Tipo T), instalados próximos aos sensores de umidade nas profundidades de 15cm e 30cm (Figuras 4 e 5). Os sensores foram conectados a um coletor de dados modelo 23X da Campbell Scientific, através de um multiplexador modelo AM16/32 da Campbell Scientific e cabos coaxial para os sensores de umidade.



Figura 4. Instalação dos sensores no campo.



Figura 5. Sensores no campo. (30 cm e 15 cm).

Um computador foi acoplado ao sistema para a comunicação via porta serial com o datalogger, para o processamento dos dados de acordo com o algoritmo de lógica fuzzy, e para o envio do comando resultante para a placa digital E/S, instalada na CPU e conectada à placa condicionadora de relés, instalada para em conjunto condicionar a ação resultante de ligar, desligar, permanecer ligada ou permanecer desligada para as respectivas bombas submersíveis Anauger® 700.

3.1.1 Componentes do sistema eletrônico

Sistema de aquisição de dados

Os sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados CR23X (Campbell Scientific) (Figura 6) o qual apresenta doze canais analógicos, quatro de pulso, quatro de excitação e oito portas de controle. Uma grande vantagem é apresentar um teclado alfanumérico e um visor permitindo a programação e visualização em tempo real dos valores medidos, sem a necessidade de um programador externo.

Um multiplexador modelo AM16/32 da Campbell Scientific (Figura 6), com 16 canais para ligações diferenciais ou 32 canais para ligações simples foi adicionado ao sistema para aumentar a capacidade em número de sensores instalados.



Figura 6 Datalogger CR23X e Multiplexador utilizado no trabalho.

Um computador com processador K6 II 500 Mhz com 128 Mb de memória RAM (Figura 7) foi acoplado ao sistema para a comunicação via porta serial com o datalogger.

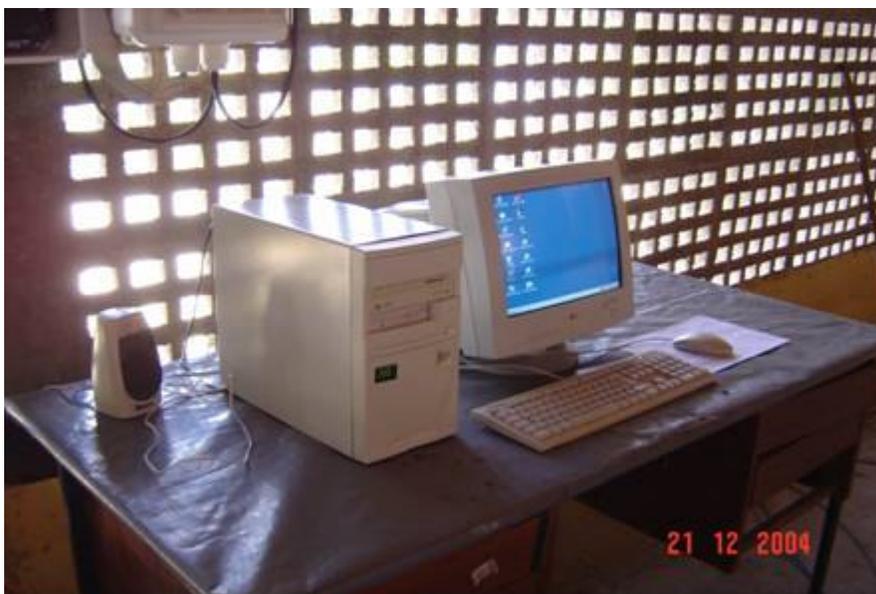


Figura 7. Computador utilizado no trabalho.

Uma placa de aquisição de dados modelo CIO-DIO24 padrão ISA (Computerboards, Inc., Mansfield, MA), foi instalada na CPU e conectada à uma placa condicionadora de relés, SSR-RACK08 com relés de estado sólido SSR-OAC-05 (Figura 8).

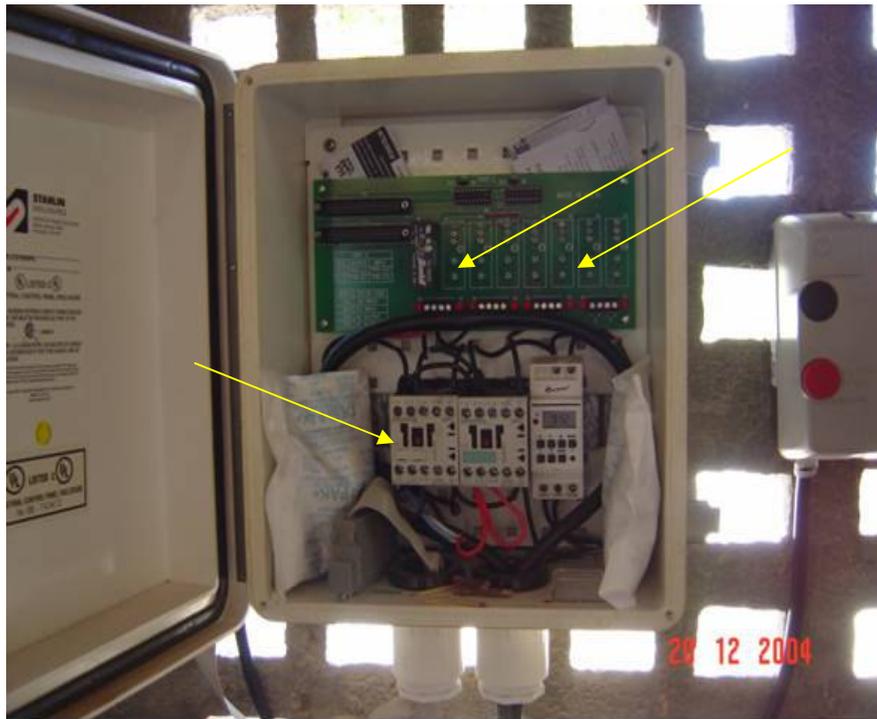


Figura 8. Visão geral da placa E/S modelo CIO-DIO24, rack e contactor.

A interação entre o usuário, o datalogger e o microcomputador, foi realizada através dos softwares PC208W, PC200W e SCWin da Campbell Scientific, em ambiente Windows, que possibilitam a coleta dos dados de modo manual ou automática.

Para a instalação dos sensores de umidade Watermark nas profundidades de 15cm e 30cm, utilizou-se 930m de cabo coaxial com quatro fios revestido e com aterramento, cujos comprimentos variaram de 47m a 63m. As soldas foram efetuadas unindo-se os fios em 2 pares, conferindo assim uma melhor comunicação com o sistema. Os sensores passaram por um processo de saturação e secagem de modo a melhorar sua resposta, antes de serem instalados úmidos no solo (Figuras 9 e 10).



Figura 9. Visão geral dos cabos para a ligação dos sensores de umidade.



Figura 10. Visão geral dos sensores de umidade em saturação.

Para a medição da temperatura do solo nas profundidades de 15cm e 30 cm utilizou-se 930 m de termopar tipo T revestido com PVC cujos comprimentos variaram de 47m a 63m (Figuras 11 e 12).

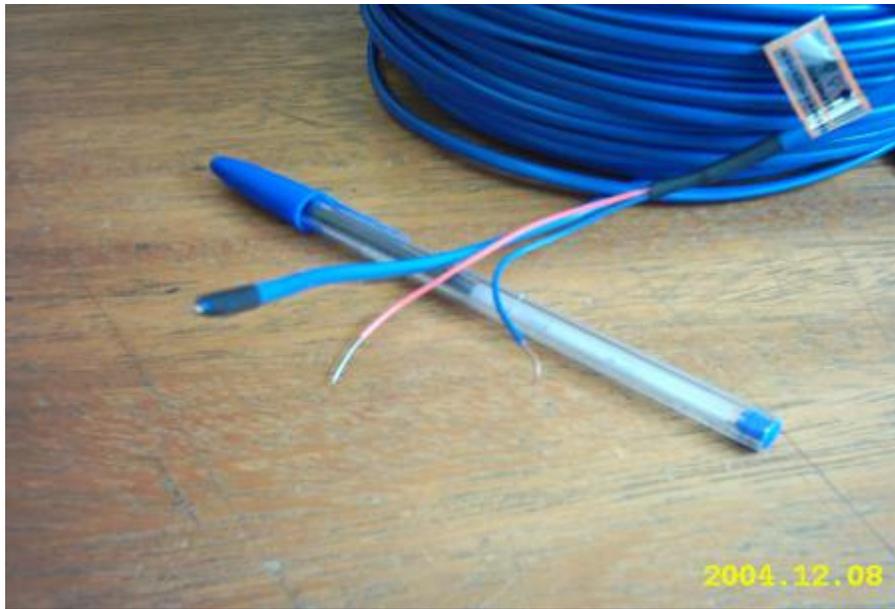


Figura 11. Termopares tipo T (cobre e constantan) utilizados no experimento.



Figura 12. Sensores de temperatura prontos para serem instalados no campo.

Para a instalação dos sensores de umidade e temperatura no solo foram utilizados um trado e um tubo de PVC de 3/4 “(19 mm) (Figura 13).



Figura 13. Instrumentos utilizados para a instalação dos sensores de umidade e temperatura do solo.

3.2 Sistema automático convencional

O sistema automático convencional utilizou dados de evapotranspiração de referência (ET_o) estimados para a região metropolitana de Fortaleza (Cabral, 2000), e coeficientes de cultura (K_c). Foi estabelecido para o experimento a utilização da média dos K_c's para todas as fases da cultura. A programação foi baseada no tempo de aplicação das lâminas brutas. As irrigações requeridas foram programadas num conjunto temporizador (timer), constituído pelo programador diário/semanal (TRON) de programação acessível através de teclado frontal com indicações de dia, hora e estado do relé visualizada através de display em LCD; e de um contactor (SIEMENS – AC-3:4Kw/5cv 380/400v 1NO 220W 60Hz). O dispositivo é dotado de uma bateria recarregável, para que, em caso de falta de energia, todos os dados fiquem retidos na memória (Figura 14).

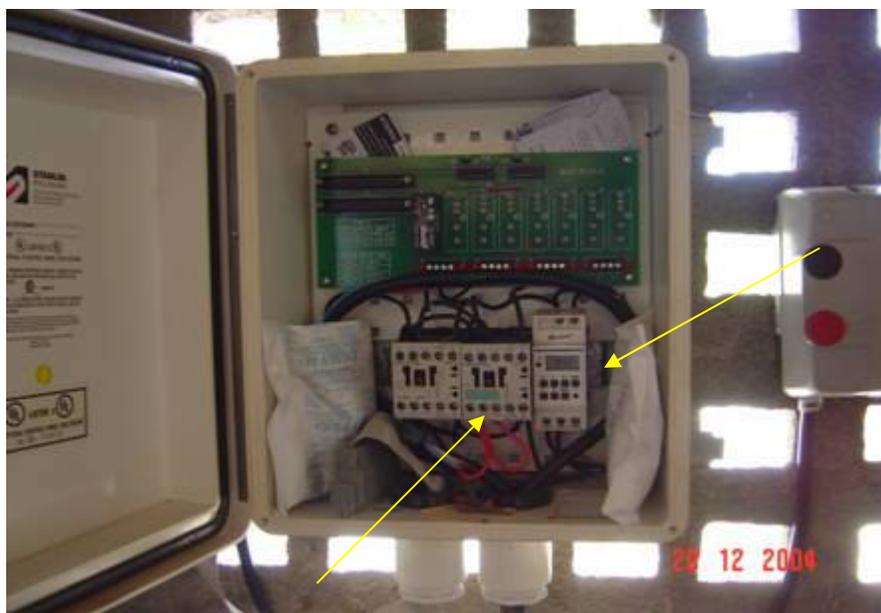


Figura 14. Visão geral do temporizados (time) formado por um contactor e um programador.

3.3 Sistema não automático

O sistema não automático utilizou dados de evaporação de tanque classe A, com a coleta desses dados realizada diariamente na Estação Meteorológica do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, para o cálculo da evapotranspiração de referência, e coeficientes de cultura (K_c), para o cálculo da evapotranspiração da cultura. O sistema utilizou um turno de rega diário com a bomba sendo acionada de forma manual, através de uma chave de partida (Figura 15).



Figura 15. Chave de partida utilizada no tratamento não automático.

3.4 Sistema de irrigação do projeto

As parcelas experimentais foram projetadas e montadas com um sistema de irrigação por gotejamento, constituído por linhas laterais de polietileno de 16 mm com gotejadores integrados, tipo Naan TIF¹ (com vazão média de 2,4 L/h operando com uma pressão de 147 kPa) espaçados de 0,5m na linha lateral e 2m entre linhas (Figura 16).

¹ A citação de marcas e modelos é colocada aqui apenas para benefício do leitor e não implica em recomendação por parte do autor ou da Universidade Federal do Ceará.



Figura 16. Linha lateral de gotejadores (Naan TIF 16 mm).

As linhas derivadas eram de PVC de $\frac{1}{2}$ " (20mm) de diâmetro com medidores de pressão instalados no início e no fim de cada linha, para a realização de leituras de pressões. As linhas principais eram de PVC de $\frac{3}{4}$ " (25mm) de diâmetro.

Cada tratamento contou com um sistema de irrigação com um cabeçal de controle composto por um injetor de fertilizante do tipo venturi de $\frac{3}{4}$ " , um filtro de disco de 1", um hidrômetro, e dois manômetros de glicerina (Figura 17). A unidade de bombeamento era constituída por uma bomba submersível Anauger® 700 de 0,6 HP de potência, com uma vazão média de 850 a 1930 L/h (Tabela 1) e uma elevação de 50m de altura manométrica total (Figura 18). As bombas foram instaladas no interior de caixas d'água de 5000 litros (NPA do Brasil), (Figura 19 e 20).

Tabela 1. Características técnicas da bomba Anauger 700 (a).

Elevação (mca)						
0	10	20	30	40	50	60 65
Vazão média (Litros/hora)						
1930	1630	1350	1150	950	850	

Fonte: Catálogo do fabricante.



Figura 17. Cabeçal de controle do sistema.



Figura 18. Bomba utilizada nos sistemas de irrigação.



Figura 19. Caixa d' água utilizada no trabalho para cada tratamento.



Figura 20. Detalhe das três caixas do experimento.

As caixas foram abastecidas por um poço com profundidade de 30 m, instalado na área do LHI, com água do tipo C1S2, utilizando-se uma bomba KING (JKB 3500rpm 3cv Ø rotor 155 mm) e um motor EBERLE (trifase 3cv 3450rpm 60Hz 220/380V 5,0/8,8A modelo: PA56EC 149 CBZ), com ligações hidráulicas independentes para cada caixa d'água (Tabela 2).

Tabela 2. Resultado da análise de água para irrigação.

Fonte	Cátions (mmol _c .L ⁻¹)					Ânions (mmol _c .L ⁻¹)				
Poço	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Σ
	0,7	1,3	3,9	0,2	3,1	3,6		2,8		6,4
CE (dS m ⁻¹)	RAS	pH	Sólidos Dissolvidos (mg L ⁻¹)			Classificação				
0,63	3,91	7,1	630			C2S1				

Fonte: Laboratório de solos – UFC.

3.5 Sistema de lógica fuzzy projetado

O método padrão para o desenvolvimento de um sistema difuso consiste na identificação e classificação dos parâmetros de entrada e saída, criação de funções de associação (grau de pertinência) para cada um deles, construção de uma base de regras e decisão de como a ação será implementada (RIBEIRO, 1998). A estrutura do modelo possui quatro componentes que são: fuzificação, base de regras, operador de inferência (modelo Mamdani) e defuzificação. O “software” utilizado para a programação do algoritmo de lógica difusa foi o Matlab 5.0 da MathWorks, Inc.

Algoritmo difuso

O procedimento de execução do algoritmo difuso utilizado neste estudo foi o seguinte:

- 1-Aquisição de valores de entrada de umidade do solo à 15 cm (umi15) e à 30 cm (umi30), de profundidade;
- 2-Fuzificação dos dois valores de entrada (umi15 e umi30);

3-Determinação dos valores antecedentes para a base de regras usando valores difusos de entrada;

4-Inferir o conseqüente valor difuso de saída, requerimento de irrigação (requirr);

5-Defuzificação dos valores de saída para o controle de irrigação propriamente dito.

Valores de entrada e saída do modelo difuso

A Tabela 3 a seguir apresenta os valores mínimos e máximos dos parâmetros de entrada e saída para o modelo difuso proposto.

Tabela 3. Valores máximos e mínimos dos parâmetros de entrada a saída difuso.

Nome	Descrição	Unidade	Mínimo	Máximo
Entrada				
umi15	Umidade do solo a 15 cm	kPa	0	200
umi30	Umidade do solo a 30 cm	kPa	0	200
Saída				
requirr	Requerimento de irrigação	unidade	0	1

Função de associação (pertinência)

O projeto de criação da função de associação é geralmente um processo intuitivo, não existindo nenhum procedimento amplamente aceito para projetar sistematicamente funções de associação. Os parâmetros do projeto são: forma das funções de associação, número de conjuntos difuso no universo de discurso para cada parâmetro de entrada e saída, localização e locação e sobreposição das funções de associação. A cada valor de entrada e saída é atribuído seu próprio conjunto de funções de associação. As funções de associação triangulares são formadas usando linhas retas. Este tipo foi escolhido

para este estudo por causa de sua simplicidade. São expressas da seguinte maneira:

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \dots\dots\dots(4)$$

Onde:

x = qualquer valor de entrada / saída;

a e c = são parâmetros localizados na base do triangulo;

b = parâmetro localizado no pico do triangulo.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os valores dos conjuntos difusos para os parâmetros de entrada e saída propostos.

Tabela 4. Valores dos conjuntos difuso de entrada.

Nome	Descrição	Esquerda	Centro	Direita
umi15				
mu	Muito úmido	0	0	50
umi	Úmido	0	50	100
med	Médio	50	100	150
sec	Seco	100	150	200
ms	Muito seco	150	200	200
umi30				
mu	Muito úmido	0	0	50
umi	Úmido	0	50	100
med	Médio	50	100	150
sec	Seco	100	150	200
ms	Muito seco	150	200	200

Tabela 5. Valores dos conjuntos difusos de saída.

Nome	Descrição	Esquerda	Centro	Direita
requirr				
mb	Muito baixo	0	0	0,25
bai	Baixo	0	0,25	0,50
med	Médio	0,25	0,50	0,75
alt	Alto	0,50	0,75	1
ma	Muito alto	0,75	1	1

Regras básicas

O sistema difuso recebe conhecimentos de informações fornecidos por especialistas, ou seja, as informações são codificadas dentro do algoritmo difuso em termos de base de regras que envolvem premissas “SE – ENTÃO”. O emprego da base de regras envolve aproximações e interpolação dos argumentos que servem para mapear os dados de entrada e os dados de saída. Neste estudo foram criadas 25 regras que estão citadas abaixo, para a estimação do controle de irrigação, baseado nos resultados de umidade do solo nas duas profundidades citadas.

Base de Regras

Se umi15 é mu e umi30 é mu então reqirr é mb e/ou

Se umi15 é mu e umi30 é umi então reqirr é mb e/ou

Se umi15 é mu e umi30 é med então reqirr é bai e/ou

Se umi15 é mu e umi30 é sec então reqirr é med e/ou

Se umi15 é mu e umi30 é ms então reqirr é alt e/ou

Se umi15 é umi e umi30 é mu então reqirr é mb e/ou

Se umi15 é umi e umi30 é umi então reqirr é bai e/ou

Se umi15 é umi e umi30 é med então reqirr é bai e/ou

Se umi15 é umi e umi30 é sec então reqirr é med e/ou

Se umi15 é umi e umi30 é ms então reqirr é med e/ou
 Se umi15 é med e umi30 é mu então reqirr é bai e/ou
 Se umi15 é med e umi30 é umi então reqirr é med e/ou
 Se umi15 é med e umi30 é med então reqirr é med e/ou
 Se umi15 é med e umi30 é sec então reqirr é alt e/ou
 Se umi15 é med e umi30 é ms então reqirr é alt e/ou
 Se umi15 é sec e umi30 é mu então reqirr é med e/ou
 Se umi15 é sec e umi30 é umi então reqirr é med e/ou
 Se umi15 é sec e umi30 é med então reqirr é alt e/ou
 Se umi15 é sec e umi30 é sec então reqirr é alt e/ou
 Se umi15 é sec e umi30 é ms então reqirr é ma e/ou
 Se umi15 é ms e umi30 é mu então reqirr é med e/ou
 Se umi15 é ms e umi30 é umi então reqirr é med e/ou
 Se umi15 é ms e umi30 é med então reqirr é alt e/ou
 Se umi15 é ms e umi30 é sec então reqirr é ma e/ou
 Se umi15 é ms e umi30 é ms então reqirr é ma.

Operações de inferências e defuzificação

Cada valor difuso de entrada é essencialmente uma série de valores de associação que corresponde aos conjuntos de valores difusos definidos em seu universo de discurso. Estes valores de associação são usados para determinar quais as regras que se aplicam a uma determinada situação e em que grau cada uma se aplica. O primeiro passo no procedimento é determinar qual o valor verdadeiro antecedente de cada regra. Isto consiste em avaliar a relação difusa “se umi15 é X and umi30 é Y”. O operador “mínimo” (min) foi usado para avaliar o operador difuso “and”.

$$\mu_{xy} = (\text{umi15}, \text{umi30}) = \min\{\mu_x(\text{umi15}), \mu_y(\text{umi30})\} \dots \dots \dots (5)$$

O segundo passo envolve a aplicação de um operador de implicação para o valor conseqüente de cada regra. Isto consiste em avaliar a relação de

implicação difusa “então requirr é Z”. O operador de implicação “produto” foi aplicado para o valor conseqüente das regras.

$$\mu_z = \{(umi15, umi30), requirr\} = prod\{\min(\mu_x(umi15), \mu_y(umi30)), \mu_z(requirr)\}.....(6)$$

Os valores conseqüentes da regra foram agregados usando o operador “Maximo” (Max), isto é, selecionando os valores máximos dos valores conseqüentes de cada regra para gerar um valor de saída difuso. Foi aplicado o método do centróide (centro de massa da área) para obter o valor defuzificado do controle de irrigação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados da cultura

O ciclo da cultura do melão foi de 68 dias, sendo as colheitas realizadas aos 65 e 68 dias após o plantio. A produtividade foi de 20,51 ton/ha para o tratamento 1 (não automático); 19,50 ton/ha para o tratamento 2 (automação por timer); e 18,69 ton/ha para o tratamento 3 (automático inteligente não implementado).

4.2 Análise estatística

Uma análise estatística foi executada para verificar o desempenho dos sistemas relacionados com a produtividade.

As amostras de produtividade foram retiradas para pesagem no terço central da linha central de cada unidade experimental (24 plantas por linha). A Figura 21 resume os rendimentos obtidos em cada tratamento. No controle de irrigação não automático as amostras coletadas variaram de 15,80 a 25,07 ton/ha. No controle de irrigação automático por temporizador (timer) as amostras variaram de 8,20 a 27,13 ton/ha. No controle de irrigação inteligente (conduzido igual ao não automático) as amostras variaram de 7,90 a 28,05 ton/ha. Dois blocos apresentaram problemas e foram excluídos da análise.

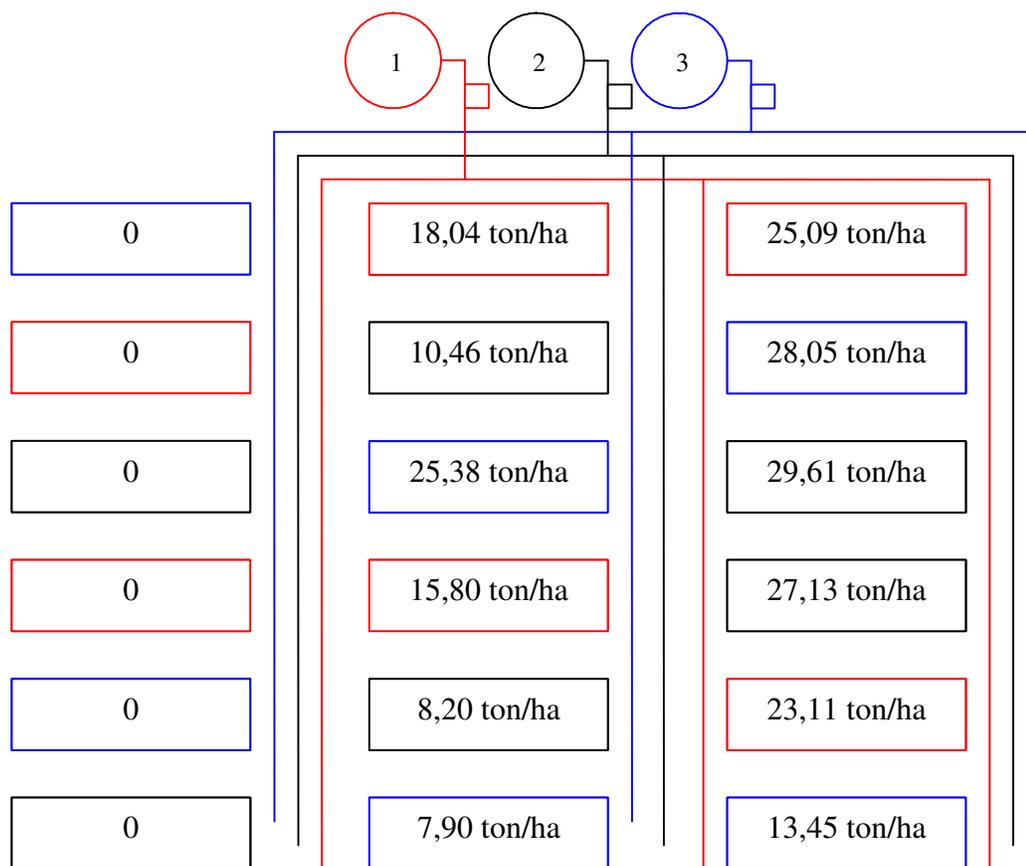


Figura 21. Distribuição das produtividades nas unidades experimentais.

Embora uma tendência em diferenças entre os tratamentos seja notada, os resultados estatísticos mostraram que não houve diferenças entre as produtividades dos tratamentos ao nível de 5% de significância (Tabela 6).

Tabela 6. Quadro da análise de variância.

Causa da variação	GL	S.Q	Q.M	F
Tratamentos	2	4,21	2,10	0,0898
Blocos	3	280,26	93,42	3,9897
Resíduo	6	140,49	23,42	
Total	11	424,96		

Análise de variância – ANOVA

Teste dos tratamentos

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$$

$$H_1: \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq \alpha_4 \neq 0$$

Como o valor calculado de $F = 0,08970$, é menor que o $F_{tab} = 5,14$, aceita-se H_0 e concluímos que não há diferença entre os três tratamentos.

Teste dos blocos

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq 0$$

Como o valor calculado de $F = 3,9906$, é menor que o $F_{tab} = 4,76$, aceita-se H_0 e concluímos que não há diferença entre os quatro blocos.

4.3 Teste de vazão

Um teste de uniformidade de aplicação d'água foi realizado no trabalho, após a instalação do sistema, para melhorar o controle da irrigação na aplicação de água.

O método utilizado para o cálculo do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen foi o proposto por Keller e Karmeli. Eles recomendaram a obtenção das vazões em quatro pontos ao longo da linha lateral, ou seja, do primeiro gotejador, do gotejador situado a 1/3 do comprimento, do gotejador a 2/3 do comprimento e do último gotejador.

O sistema funcionou com uma variação média de pressão em torno de 15%, o que justifica uma vazão maior em quase todos os gotejadores analisados, pois o mesmo segundo fabricante tem vazão média de 2,4 L/h com uma pressão de serviço de 15mca. Observou-se que a amplitude de variação da vazão foi de 2,1 L/h a 3,6 L/h. Para critérios de avaliação existem parâmetros recomendados por alguns autores que limitam a variação em torno de 10%, para a pressão e 20% para a vazão, para a uniformidade da irrigação. Com base nos valores apresentados, determinou-se o CUC que resultou num valor de 88%. Na prática, o

limite mínimo de Coeficiente de Uniformidade de Christiansen aceitável em um sistema de irrigação por gotejamento é de 80%.

4.4 Análise da evapotranspiração, das curvas de kc e da lâmina e volume acumulada dos sistemas não automático e automático por temporizador.

Observou-se que a variação da evapotranspiração de referência para o tratamento não automático (Eto1), foi de 2,53mm/dia a 6,02mm/dia ao longo do ciclo (vide tabela 16 em anexo). Esses valores foram obtidos através de leitura do tanque classe A. Para o tratamento automático (Eto2), foi de 4,98mm/dia a 5,99mm/dia ao longo do ciclo (vide tabela 17 em anexo). O valor total da Eto1 foi de 247,93mm que foi menor que a ETo do tratamento automático (Eto2) igual a 299,09mm, como mostra a Tabela 7 e Figura 22.

Tabela 7. Fases da cultura com suas respectivas durações e valores de Evapotranspiração de referência (ETo) dos tratamentos não automático e automático por temporizador (timer).

Fases da cultura	Duração (dias)	Eto tratamento não automático (mm)	Eto tratamento automático (mm)
I – Inicial	22	44,75	71,88
II – Crescimento	18	70,06	102,23
III – Intermediário	18	99,23	100,08
IV – Final	5	29,93	24,90
Total	63	247,93	299,09

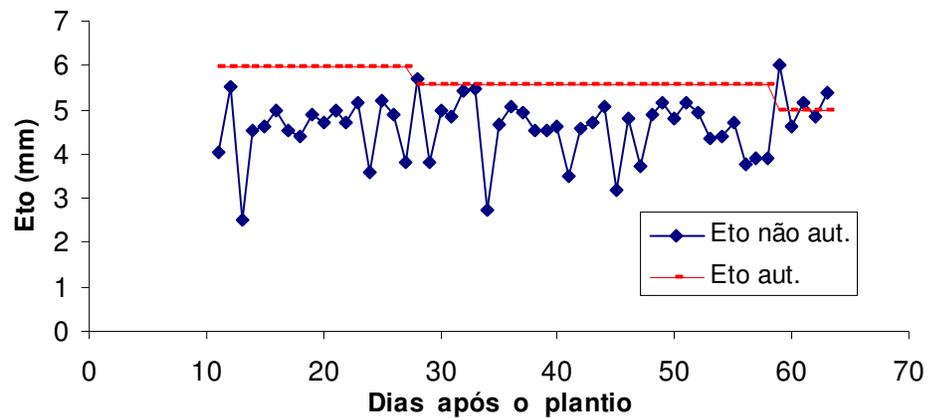


Figura 22. Variação da evapotranspiração de referência ao longo do ciclo do melão.

Na Tabela 8, observou-se os valores de evapotranspiração da cultura ETc ao longo do ciclo para os respectivos tratamentos foram de 190,90mm e 236,09mm (Figura 23).

Tabela 8. Fases da cultura com suas respectivas durações e valores de Evapotranspiração de referência (ETc) dos tratamentos não automático e automático por temporizador (timer).

Fases da cultura	Duração (dias)	Etc tratamento não automático (mm)	Etc tratamento automático (mm)
I – Inicial	22	9,40	15,09
II – Crescimento	18	33,41	72,58
III – Intermediário	18	113,90	121,09
IV – Final	5	34,19	27,31
Total	63	190,90	236,09

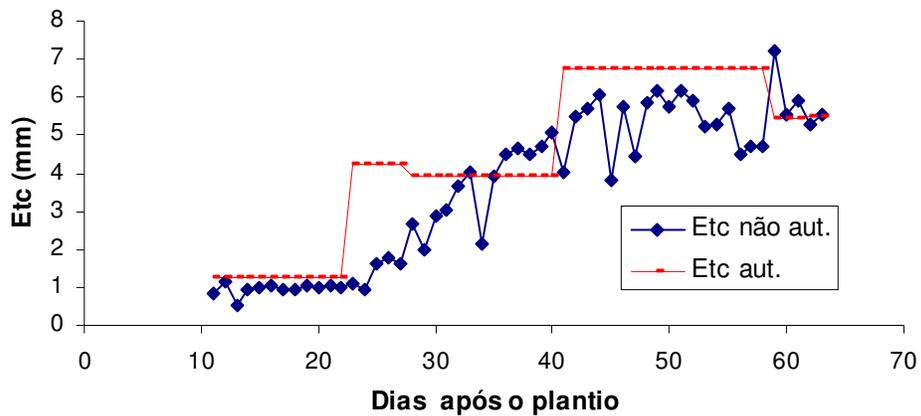


Figura 23. Variação da evapotranspiração da cultura ao longo do ciclo do melão.

Na figura 24 estão apresentadas às curvas de kc para os sistemas não automático e automático por temporizador, evidenciando-se as diferenças entre controle contínuo e controle em níveis (“stepwise”).

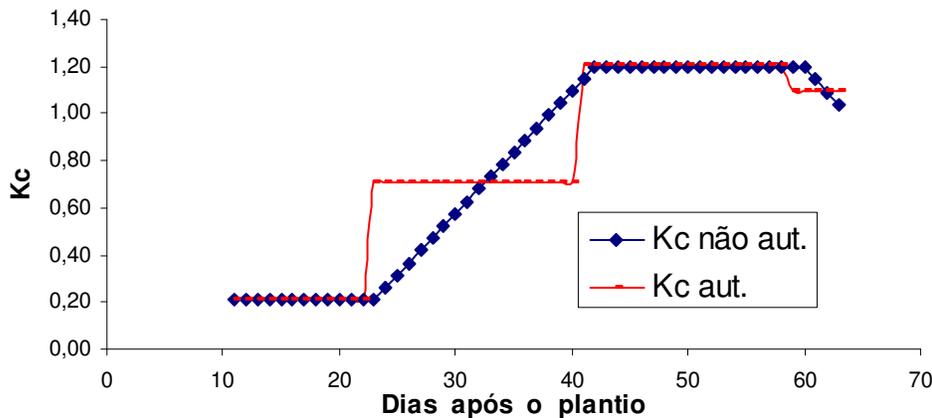


Figura 24. Variação do coeficiente de cultivo ao longo do ciclo do melão.

As lâminas brutas aplicadas no tratamento não automático variaram de 0,94 a 8,02 mm/dia, já o tratamento automático por temporizador foram de 1,40 a 7,48 mm/dia (Figura 25).

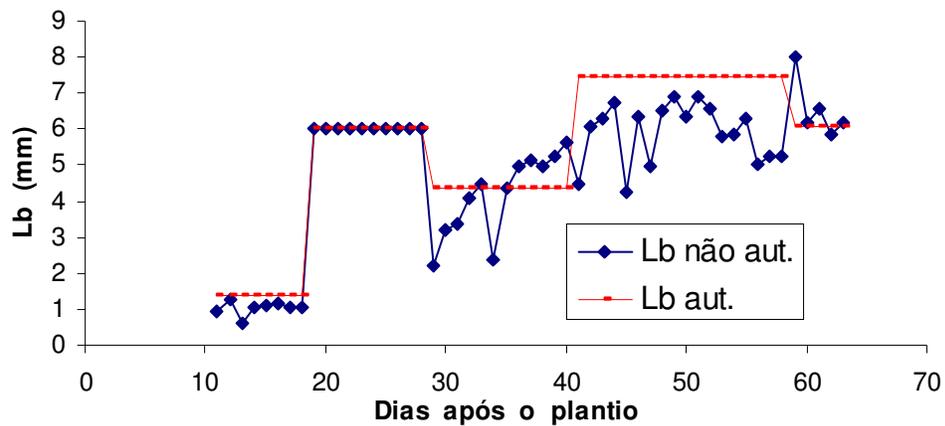


Figura 25. Variação da lâmina bruta ao longo do ciclo do melão.

Os valores de volumes aplicados nos tratamentos foram de $110,93\text{m}^3$ e $124,73\text{m}^3$, respectivamente para os tratamentos não automático e automático por temporizador, obtendo-se uma diferença de $13,80\text{m}^3$ (Figura 26).

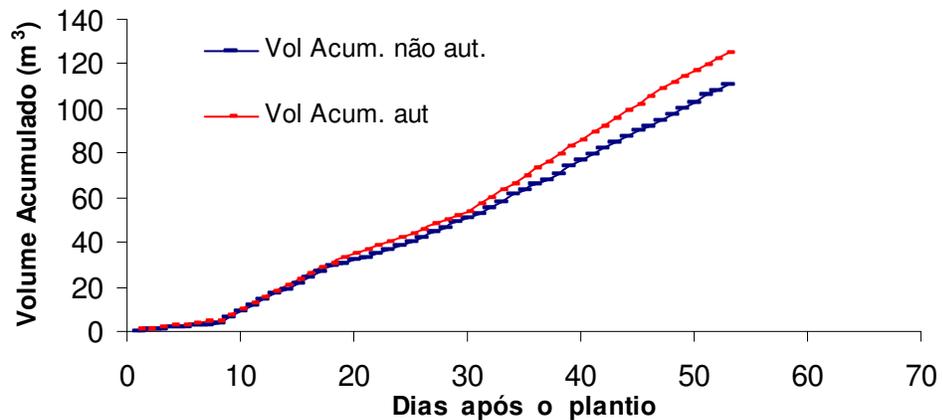


Figura 26. Variação do volume acumulado aplicado ao longo do ciclo do melão.

O tempo de funcionamento da bomba para o sistema não automático foi de 85,59 horas e de 96,23 horas para o sistema automático por temporizador. Do ponto de vista econômico pode-se levar em conta as horas trabalhadas para manter os sistemas em pleno funcionamento. Para o tratamento não automático

foram gastas em média 156 horas trabalhadas ao longo de todo o ciclo da cultura, tempo este referente ao cálculo do tempo de funcionamento, acionamento da bomba, limpeza do filtro e posterior desligamento da bomba. Para o tratamento automático por temporizador foi gasto apenas 27 horas durante todo o ciclo da cultura, tempo este referente aos dias de programação, monitoramento e limpeza do filtro (Figura 27).

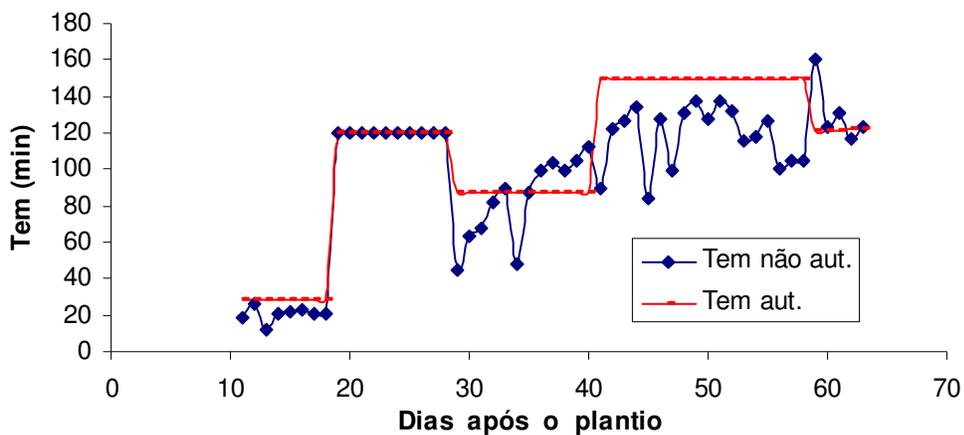


Figura 27. Variação do tempo de operação do sistema ao longo do ciclo do melão.

A diferença de custo de mão-de-obra entre o sistema não automático (R\$ 300,00) e automático por temporizador (R\$ 50,00) foi maior que o valor do investimento inicial com o temporizador (R\$ 150,00).

5. CONCLUSÕES

Três sistemas de controle de irrigação com diferentes níveis de automação: não automático, automático por temporizador e automático inteligente foram montados e instalados na área experimental do Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, no Campus do Pici, em Fortaleza, Ceará.

Os sistemas não automático e automático por temporizador não apresentaram diferença estatística quanto à produtividade para um nível de significância de 5%.

Os sistemas funcionaram com uma variação de pressão em torno de 15%, portanto, dentro dos critérios aceitáveis quanto à uniformidade.

Os valores de evapotranspiração da cultura ao longo do ciclo para o tratamento não automático foram menores que para o tratamento automático por temporizador devido aos diferentes critérios utilizados para o manejo desses sistemas. O critério para o sistema não automático era reativo e diário enquanto que para o sistema automático por “timer” era preditivo baseado numa série histórica de 30 anos de dados climáticos para Fortaleza para os meses de novembro, dezembro e janeiro.

A lâmina bruta aplicada para o tratamento automático por temporizador foi maior portanto que a aplicada no tratamento não automático, com uma diferença de volume aplicado de $13,81\text{m}^3$, evidenciando que o fato de um sistema ser automático, utilizando um “timer”, não significa que esse sistema seja o mais eficiente na utilização dos recursos e insumos, podendo apenas reduzir a necessidade de mão-de-obra.

Podemos concluir do que foi exposto que o critério de manejo tem grande influência na automação de um sistema e que o uso de um temporizador como método de automação não melhora necessariamente a irrigação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; JENSEN, M.E.; WRIGGHT, J. T. and BURMAN, R. D. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Mandson: Agronomy Journal*, v. 81, n. 4, p.650-662, july/aug. 1989.

ALLEN, R. G. ; PEREIRA, L. S. ; RAES, O. ; SMITH, M. *Crop Evapotranspiration*. Rome FAO, 1998. 297 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56).

ARAÚJO, J. P. *Cultura do melão*. Petrolina: EMBRAPA – CPATSA, 1980. 40p.
FERREIRA, F. A.; PEDROSA, J. F.; ALVARENGA, M, A. *Melão: cultivares e métodos culturais*. Informe Agropecuário, v.8, n.85, p.26-28, 1982.

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

BRAGA, N. C. *Curso básico de eletrônica*. São Paulo: Editora: Saber, 1999, v.1, 140p.

BAUSCH, W. C.;BERNARD, T. M. 1996. Validity of the watermark sensor as a soil moisture measuring device. *Proceedings of the international conference on evapotranspiration and irrigation scheduling*, San Antônio, Texas, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 933-938.

BARDOSSY, A .; DISSE, M. 1993. Fuzzy rule-based models for infiltration. *Water resources research* 29(2):373-382.

BENAMI, A.; OFFEN, A . 1984. *Irrigation engineering*. IESP, Hiafa, Israel ISBN, 965-222-029-9. 257p.

BERNARDO. S. *Manual de Irrigação*. 6 ed. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 1995.
CARVALHO, D. F.; SILVA, W. A ; MEDICE, L. O .;PEREIRA, M. G. *Avaliação de um sistema automático de baixo custo para manejo da irrigação (compact disc)*. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, 30., Foz do Iguaçu 2001. Anais, Foz do Iguaçu, SBEA, 2001.

CASTRUCCI, P. B. L. *Controle automático: teoria e projeto*. São Paulo: EDUSP, 1969. 280p.

CAMPBELL, G. S. 1992. On-line estimation of grass reference evapotranspiration with the Campbell Scientific automated weather station. *Campbell Scientific application note*, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, 22p.

CAHOON, J.; FERGUSON, J.; EDWARDS, D.; TACKER, P. 1990. A microcomputer-based irrigation scheduler for the humid mid-south region *applied engineering in agriculture* 6(3):289-294.

CABRAL, R. C. Evapotranspiração de Referência de Hargreaves (1974) Corrigido pelo Método de Penman-Monteith/FAO (1991) para o Estado de Ceará. 2000, Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Agronomia. Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE.

CLYMA, H. E.; MARTINS, D. L. 1996. Irrigation management using fuzzy logic. Proceedings of the international conference on evapotranspiration and irrigation scheduling, San Antônio, Texas, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 1134-1139.

COSTA, C. P; PINTO, C. A. B. P. Melhoria de hortaliças. Piracicaba: ESALQ, 1977.p.164-184.

DUKE, H. R. STETSON, L.E.; CIANCAGLINI, N. C. 1990. Irrigation system controls. In Hoffman, G. J.; T. A . Howell, and K. H. Solomon. Management of farm irrigation systems. ASAE, St. Joseph, MI, pp. 265-312.

EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; UPCHURCH, D. R.; WANJUR, D. F. 1996. Conopy temperature based automatic irrigation control proceedings of the international conference on evapotranspiration and irrigation scheduling, San Antônio, Texas, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 207-213.

ELDREDGE, E. P.; SHOCK, C. C.; STIEBE, T. D. 1993. Calibration of granular matrix sensor of irrigation management. Agronomy Journal 85:1228-1232.

CUENCA, R. H. Irrigation System Design - An Engineering Approach. S. Jersey: Hall, Englewood Cliffs, 1989, 552p.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; McCONNELL, K. G. Instrumentation for Engineering Measurements. 2 nd ed., 1993 New York.

DAKER, A, Irrigação e Drenagem; A Água na Agricultura, 3 Vol. 7 ed. Ver. ampl. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1988, 669 p.

DOORENBOS. J.; PRUITT. W. O Necessidades Hídricas das Culturas. 5 ed, Rome: FAO, 1977. 204 p. (Estudos FAO, Irrigação e Drenagem, 24).OLITA, A, F. L. Métodos de Irrigação – 10 ed, São Paulo: Nobel, 1984, 267p.

FAO (ROME ITALY) Base de dados agrícolas FAOSTAT: Cultivos primários: melão produção. Disponível em: <http://www.fao.org> consultado em outubro de 2004.

FERREIRA, R. S. Matemática Aplicada às Ciências Agrárias: Análise de Dados e Modelos – Viçosa: UFV, 1999 333 p.

FERREIRA, L. G. R. Fisiologia Vegetal: Relações hídricas. Fortaleza, Edições Uni. Fed. Ceará, 1988. 138 p.

FIALHO, F. B. Modernização no controle da produção de suínos – zootecnia de precisão. In: Simpósio Brasileiro de Ambiente e Qualidade na Produção Industrial de Suínos. Piracicaba, 1999. Resumos. Piracicaba, 1999, p.61-80

FANGMEINER, D. D.; GARROT, Jr. D. J.; MACINO, C. F.; HUSAMN, S. H. 1990. Automated irrigation systems using plant and soil sensors in visions of the future. Proceedings of the third national irrigation symposium, Phoenix, Arizona, ASAE, St. Joseph, MI, pp.533-537.

FREIRE, C.R.F. Análise do trabalho rural no nordeste do Brasil. Piracicaba, 2000. 75p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

GOMES, F. P. Estatística Experimental. 14 ed. Ver. Amp. Piracicaba, 2000, 477

GORNAT, B.; SILVA, W. L. V. Sistemas de controle e automatização da irrigação. Irrigação e tecnologia moderna, n. 41, p.20-24, 1990.

GOWING, J.; TARIMO, A.; EL-AWARD, O. 1996. A rational method for assessing irrigation performance at farm level with aid of fuzzy set theory. Irrigation and drainage systems 10:319-330, Kluwer academic publishers, Netherlands.

GOMES, H. P. Engenharia de Irrigação: Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento. 3 ed. Campina Grande: UFPB, 412 p.

HOWELL, T. A .1996. Irrigation scheduling reseach and its impacto n water use. Proceedings of the international conference on evapotranspiration and irrigation scheduling, San Antônio, Texas, ASAE, St. Joseph, MI, pp. 21-33.

JENSEN, M. E. 1969. Scheduling irrigation with computers. Journal of soil and water conservation 24(5):193-195.

JENSEN, M. E.; ROBB, D. C. N.; FRANZE. 1970. Scheduling irrigation using climate-crop-soil data. Journal of irrigation and drainage division. ASCE, 96(IRI):25-38.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requeriments. New York, ASCE. 1990. 332p. (manuals and reports 70).

JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; PRATT, B, J. Estimating soil misture depletion from climate, crop and data. Trans of the ASAE, 14(5):954-959, 1971.

JENSEN, M. E. Consuptive use of water and irrigation water requeriments. amer. soc. civil eng., New York, 215pp. 1973.

KIEHL. E. J. Manual de Edafologia. Editora Ceres, São Paulo., 1979, 262 p.

- KLAR, A. E. Água no sistema. 2ª Edição, São Paulo: Nobel, 1988. 408p.
- KOCH, P. R. 1993. Artificial neural networks: new tools for predicting yields. ASAE. Paper n.934-513, St. Joseph, MI.
- LIBARDI, P. L. Dinâmica da Água no Solo. 2. ed. Piracicaba-SP: P.L., 1999, 497 p.
- MALLICK, M. F. R.; MASSUI, M. Origin, distribution and taxonomy of melons. Scientia Horticulturae, Amsterdam, v. 28, p.251-261, 1986.
- McCLEDON, R. W.; SEGNER, I.; JONES, J. W. 1991. Optional control applied to peanut irrigation management. ASAE, Paper n.912-129, St. Joseph, MI.
- McCLANN, I. R.; Kincaid, D. C.; WANG, D. 1992. Operation characteristics of the watermark model 200 soil watermark potential sensor for irrigation management. Applied engineering in agriculture 8(5): 603-609.
- MENDOZA, G. Compendio de mercadeo de productos agropecuarios. San Jose-Costa Rica IICA, 1980; 343p.
- MEDEIROS, A. T. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de penman-monteith, de medidas lisimétricas e equações empíricas em Paraipaba-CE. 2002. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo.
- MIRANDA, J. H. ; PIRES R. C. M. Série Engenharia Agrícola 1 e 2, Piracicaba: FUNEP, 2001.
- MIRANDA, F. R. A distributed control system for priority-based site-specific irrigation. 2003. Tese (Doutor em Engenharia de Biosistemas) – The University of Tennessee. UT. Estados Unidos.
- MIRANDA, F. R; YODER, R. R; SOUZA, F. Instalação de um Lisímetro de pesagem no Projeto de Irrigação Curu-Paraipaba, CE. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande-PB, v. 3, n. 1, p. 103-110, 1999.
- MILLAR, A. Manejo racional da irrigação: uso de informações básicas sobre diferentes cultivos. 2ª Edição. IICA/PRONI. 1989.
- PEREIRA, A, R. Evapo(tranpi)ração. Piracicaba, FEALQ, 1997. 183 p.
- PREVEDELLO, C. L. Física do Solo com Problemas Resolvidos – Curitiba 1996 446 p.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil e grass. Proc. R. Soc. London, A193:120-146, 1948.

PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. *Nethj. Agric. Sci.*, 4:9-29. 1956.

PHENE, C. J.; DETAR, W. R.; CLARK, D.A. 1992. Real-time irrigation scheduling of cotton with an automated pan evaporation system. *Applied engineering in agriculture* 8(6):787-793.

PHENE, C. J.; REGINATO, R. J.; ITIER, B.; TANNER, B. R. 1990. Sensing irrigation needs. In: Hoffman, G. T.; T. A. Howel, and K. H. Solomon. *Management of farm irrigation systems*. ASAE. St. Joseph, MI, pp. 207-261.

PHENE, C. J. 1986. Operation principles: automation. In *trickle irrigation of crop production: design, operation and management*, ed. F. S. Nakayama and D.A. Bucks, Elsevier, Tokyo, pp.188-215.

PHENE, C. J.; HOFFMAN, G. J.; AUSTIN, R. S. 1973. Controlling automated irrigation with soil matric potential sensor. *Transactions of the ASAE*, Paper n. 71-230, St. Joseph, MI.

PHENE, C. J.; HOWELL, T. A. 1984. Soil sensor control of heigt-frequency irrigation systems. *Transactions of the ASAE*, Paper n.81-2013, St. MI.

PHENE, C. J. 1989. Techniques for computerized irrigation management. *Computers and electronics in agriculture*. 3:189-208, Elsevier science publishers B. V., Amsterdam, the Netherlands.

REICHARDT, K. *Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera*. 4 ed, ver. ampliada. Campinas, Fundação Cargill, 1985, 445 p.

REICHARDT, K. *A água em sistemas agrícolas*. São Paulo: Manole, 1987.

RIBEIRO, R. S. F.; YODER, R. E. An Automated Fuzzy Irrigation Control System. *Proceedings of the International Irrigation Association Technical Conference, 1997*, Nashville, TN, pp. 171-178.

RIBEIRO, R. S. F. 1998. *Fuzzy Logic Based Automated Irrigation Control System Optimized via Neural Networks*. Tese (Doutor em Engenharia de Biosistemas) - The University of Tennessee. UT. E.U.A.

RIBEIRO, R. S. F.; YODER, R. E.; WILKERSON, J. B.; RUSSEL, B. D. Sistema inteligente de controle automático de irrigação. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29.*, 2000, Fortaleza. *Anais*. Fortaleza: CONBEA, 2000. 1 CD-ROM.

SHEARER, M. V.; VOMOCIL, J. 1981, Twenty-five years of promoting irrigation scheduling. In: *Irrigation scheduling for water and energy conservation in the 80`s* ASAE Especial publication 23-81. St. Joseph, MI, pp. 208-212.

SHOCK, C. C.; FIBERT, E.; SAUNDERS, M. 1996. Malheur experiment station annual report. Special report 964, Oregon State University, Ontario, OR.

SILVA, I. J. Desenvolvimento de modelos matemáticos para análise da influência das condições ambientais na produção de ovos. Campinas, 1998. 140p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas.

SILVA, A. A. G. Avaliação da eficiência dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Parnaíba –PI. Piracicaba 1989. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo.

SILVA, K. O. desenvolvimento de sistemas automatizado de baixo custo para aquisição de dados de umidade e temperatura do ar. Piracicaba, 2000. 70p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

SMITH, M. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Rome, FAO. 45p. 1991.

STEVENSON, W. J. Estatística Aplicada à Administração – São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1981. 495 p.

SMITH, P. C.; JOHNSON, A. I.; FISHER, C. P.; WOMACK, L. M. The use of nuclear meters in soils investigations. Philadelphia Pa: American society testing and materials. 1968.

SOUZA, R. O. R. M. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação automatizado para áreas experimentais, 2001. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

THOMSON, S. J.; ARMSTRONG, C. F. 1987. Calibration of the watermark model 200 soil moisture sensor. Applied engineering in agriculture. 3(2):186-189.

THOMSON, S. J.; YOUNOS, T.; WOOD, K. 1996. Evaluation of calibration equations and application methods for the watermark® granular matrix soil moisture sensor. Applied engineering in agriculture 12(1): 99-103.

UHRIG, J. W.; ENGEL, B. A.; BAKER, W. L. 1992. An application of neural networks: predicting corn yields. Proceedings of the 4TH international conference on computers in agricultural extension programs, Lake Buena Vista, Florida.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. 1993. Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado do Ceará. 248 p.

VANBAVEL, C. H.; WILSON, T. V. 1952. Evapotranspiration estimates as criteria for determining time of irrigation. *Agricultural engineering* 33(7):417-418, 420p.

VERMEIREN. L. ; JOBLING. G. A, Irrigação Localizada. Rome: FAO, 1980. 184 p. (Estudos FAO, Irrigação e Drenagem, 36).

VILELA, E. D. D. Acesso a porta paralela do PC. *Saber Eletrônica*, n. 319, p. 42-43, 199.

ZAZUETA, F. S.; XIN, J. N.; WHEATON, A.; JACKSON, J.;ALMED, M. 1994. Development of a computer-based control system for reclaimed water citrus irrigation proceedings of the 5TH international conference on computers in agriculture, Orlando, FL.

XIAG, H.; VERMA, B. P.; HOOGENBOOM, G. 1994. Fuzzy irrigation decision support system. ASAE. Paper n. 943557, St. Joseph, MI.

XIN, J. N.; ZAZUETA, F. S.; SMAJSTRLA, A. G.; WHEATON, T. A. 1995. Real-time expert system for citrus microirrigation management. Proceeding of the 5TH international microirrigation congress, Orlando, Florida, ASAE, St. Joseph, MI. pp.787-791.

YODER, R. E., D. L. JOHNSON, J. B. WILKERSON, AND D. C. YODER. 1998. Soil Water Sensor Performance. *Applied Engineering in Agriculture* 14(2):121-133

Anexos

Tabela 9 Características físicas do solo da área experimental.

Camada (m)	Composição granulométrica (g/kg)					Classificação textural.
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Argila natural	
0 – 15	480	360	90	70	30	Areia franca
15 – 30	410	390	90	110	10	Franco arenoso

Camada (m)	Grau de flocculação (g/100g)	Densidade (g.cm ⁻³)		Umidade em peso (kg.kg ⁻¹)		pH	
		Global	Partículas	0,033 MPa	1,5 MPa	Água útil	Água útil
0 – 15	57	1,47	2,66	5,48	3,49	1,99	6,5
0 – 30	91	1,48	2,62	7,13	4,39	2,74	5,5

Fonte: Laboratório de Solos UFC.

Tabela 10. Características químicas do solo da área experimental.

Camada (m)	Condutividade elétrica (CE) (dS.m ⁻¹)	C (g.kg ⁻¹)	N (g.kg ⁻¹)	M.O (g.kg ⁻¹)	C/N	P (mg.kg ⁻¹)	Complexo sortivo (cmol _c .kg ⁻¹ de solo)								V (%)	PST (%)
							Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	H ⁺ +Al ⁺³	Al ⁺³	S	CTC		
0 – 15	0,18	3,90	0,40	6,72	10	20	1,70	0,70	0,10	0,10	0,66	0,00	2,6	3,3	79	3
0 – 30	0,15	3,66	0,39	6,31	9	13	1,20	0,80	0,10	0,07	0,99	0,15	2,2	3,2	69	3

Fonte: Laboratório de Solos UFC.

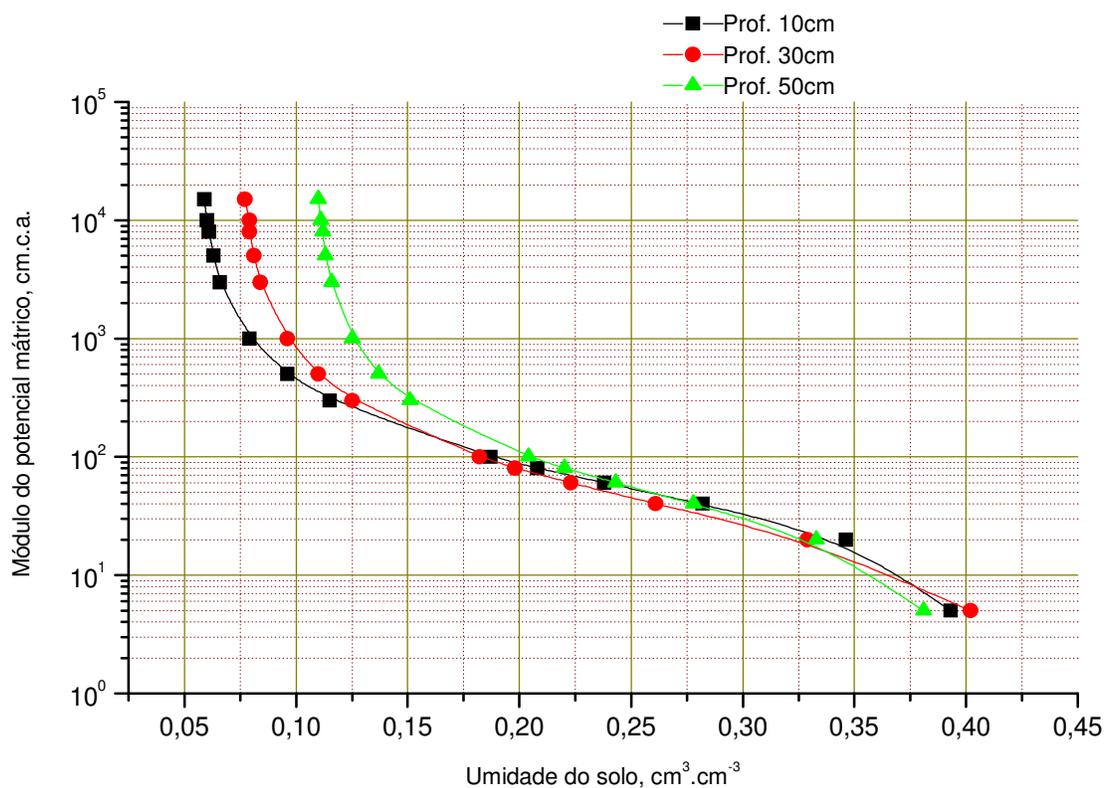


Figura 28. Curvas características da água no solo nas profundidades 10, 30 e 50 cm no Laboratório de Hidráulica e Irrigação.

EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN

$$\theta_a = \theta_r + \left(\frac{\theta_o - \theta_r}{\left(1 + (\alpha |\psi_m|)^n\right)^m} \right)$$

θ_a – umidade atual do solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

θ_o – umidade de saturação do solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

θ_r – umidade residual do solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

α , n e m – parâmetros da equação de Van Genuchten

Tabela 11. Parâmetros da equação de van Genuchten e densidades do solo.						
Prof,	$\theta_o (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\theta_r (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\alpha (\text{m}^{-1})$	n	m	$\rho (\text{g/cm}^3)$
10	0,399	0,056	0,03265	1,7717	0,4356	1,45
30	0,415	0,074	0,05071	1,6938	0,4096	1,48
50	0,387	0,108	0,03876	1,7581	0,4312	1,52

Tabela 12. Características técnica dos tubos gotejadores.

Características técnicas	Espessura da parede (mm)	Diâmetro interno (mm)	Bobina (m)	Vazão nominal (l/h)	Pressão de serviço (bar)
NaanTIF 25 16 mm	0,65	13,9	500	1/2/4	1,0-3,0
NaanTIF 16 mm	0,90	13,9	500	1/2/4	1,0-35
NaanTIF 18 mm	0,85	16,0	400	1,6	1,0-30
NaanTIF 20 mm	0,90	18,0	300	1,6	1,0-30

Tabela 13. Características técnica dos tubos gotejadores (vazão x pressão).

Pressão (P. bar)	Vazão (Q l/h)			
	NaanTIF 25		NaanTIF 18/20 m	
	16/1	16/2	16/4	16.1
0,5	0,99	1,52	2,77	1,11
1,0	1,42	2,20	4,00	1,61
1,5	1,75	2,73	4,96	2,00
2,0	2,04	3,18	5,78	2,33
2,5	2,28	3,58	6,50	2,63
3,0	2,51	3,96	7,16	2,89
	Q = a . P ^x			
a	1,42	2,20	4,00	1,61
x	0,518	0,530	0,530	0,531

Tabela 14. Dados Climatológicos de Fortaleza-Ce (1966 – 1999) Latitude: 3°44'S; Altitude: 20m Longitude: 38°33'W.

Mês	Tmax*	Tmin*	UR*	Insolação*		Vel. Vento*		PPT*	ETo(mm)	
	(°C)	(°C)	(%)	(h.mês ⁻¹)	(h.dia ⁻¹)	(m.s ⁻¹)	(km. dia ⁻¹)	(mm)	PM	HG
Jan	30,6	24,3	78	220,4	7,11	3,7	319,7	116,9	154,1	145,7
Fev	30,3	23,8	80	176,7	6,31	3,5	302,4	198,1	130,8	126,0
Mar	29,8	23,5	84	150,4	4,85	2,7	233,3	345,6	122,1	127,1
Abr	29,9	23,4	84	153,3	5,11	2,6	224,6	335,1	115,3	117,0
Mai	30,1	23,2	83	205,5	6,63	3,2	276,5	228,8	127,1	117,8
Jun	29,9	22,8	81	232,0	7,73	3,4	293,8	166,2	128,1	111,0
Jul	28,9	22,7	78	259,4	8,37	3,8	328,3	86,2	139,8	124,0
Ago	30,3	22,6	75	283,0	9,13	4,5	388,8	31,3	169,6	139,5
Set	30,6	23,2	73	273,6	9,12	4,9	423,4	21,9	179,4	144,0
Out	30,9	23,8	73	281,1	9,10	4,7	406,1	13,7	187,9	158,1
Nov	31,0	24,4	74	277,7	9,26	4,6	397,4	13,5	179,7	150,0
Dez	31,1	24,5	76	261,4	8,43	4,2	362,9	42,0	172,1	151,9
Total				2775,5				1599,3	1805,9	1612,1

*Fonte: Estação Meteorológica do Campus do Pici-UFC.

Tabela 15. Características técnicas da bomba Anauger 700 (b)

Características técnicas				
Modelo	Tensão (V)	Freqüência (Hz)	Corrente (A)	Potência (Hp)
700	110	60	15	0,6
	125		14	
	220		7,5	
	250		6,5	

Fonte: Catálogo do fabricante

Tabela 16. Manejo da irrigação do tratamento não automático

Dias	ECA (mm/dia)	Eto (mm/dia)	Kc	Etc (mm/dia)	LB (mm/dia)	Tempo (min)	Volume (L)	Volume (m ³)	V. Acum.(m ³)
1	Plantio		0,21						
2	Casa de veg.		0,21						
3	Casa de veg.		0,21						
4	Casa de veg.		0,21						
5	Casa de veg.		0,21						
6	Casa de veg.		0,21						
7	Casa de veg.		0,21						
8	Casa de veg.		0,21						
9	Transplântio		0,21						
10	Transplântio		0,21						
11	7,5	4,03	0,21	0,85	0,94	18,80	406,17	0,41	0,41
12	10,3	5,53	0,21	1,16	1,29	25,82	557,81	0,56	0,96
13	4,7	2,53	0,21	0,53	0,59	11,78	254,53	0,25	1,22
14	8,4	4,51	0,21	0,95	1,05	21,06	454,91	0,45	1,67
15	8,6	4,62	0,21	0,97	1,08	21,56	465,74	0,47	2,14
16	9,3	5,00	0,21	1,05	1,17	23,32	503,65	0,50	2,64
17	8,4	4,51	0,21	0,95	1,05	21,06	454,91	0,45	3,10
18	8,2	4,41	0,21	0,93	1,03	20,56	444,08	0,44	3,54
19	9,1	4,89	0,21	1,03	6,00	120,00	2592,00	2,59	6,13
20	8,8	4,73	0,21	0,99	6,00	120,00	2592,00	2,59	8,73
21	9,3	5,00	0,21	1,05	6,00	120,00	2592,00	2,59	11,32
22	8,8	4,73	0,21	0,99	6,00	120,00	2592,00	2,59	13,91
23	9,6	5,16	0,21	1,08	6,00	120,00	2592,00	2,59	16,50
24	6,7	3,60	0,26	0,94	6,00	120,00	2592,00	2,59	19,09
25	9,7	5,21	0,31	1,64	6,00	120,00	2592,00	2,59	21,69
26	9,1	4,89	0,37	1,79	6,00	120,00	2592,00	2,59	24,28
27	7,1	3,81	0,42	1,60	6,00	120,00	2592,00	2,59	26,87
28	10,6	5,69	0,47	2,68	6,00	120,00	2592,00	2,59	29,46
29	7,1	3,81	0,52	1,99	2,22	44,30	956,93	0,96	30,42
30	9,3	5,00	0,57	2,87	3,19	63,82	1378,41	1,38	31,80
31	9,0	4,84	0,63	3,03	3,37	67,36	1454,88	1,45	33,25
32	10,1	5,43	0,68	3,68	4,09	81,87	1768,42	1,77	35,02
33	10,2	5,48	0,73	4,01	4,45	89,03	1922,99	1,92	36,94
34	5,1	2,74	0,78	2,15	2,38	47,69	1030,02	1,03	37,97
35	8,7	4,67	0,84	3,90	4,34	86,76	1874,00	1,87	39,85
36	9,4	5,05	0,89	4,48	4,98	99,59	2151,09	2,15	42,00
37	9,2	4,94	0,94	4,64	5,16	103,19	2228,95	2,23	44,23
38	8,4	4,51	0,99	4,47	4,97	99,44	2148,00	2,15	46,38
39	8,4	4,51	1,04	4,71	5,23	104,67	2260,87	2,26	48,64
40	8,6	4,62	1,10	5,06	5,63	112,51	2430,26	2,43	51,07
41	6,5	3,49	1,15	4,01	4,45	89,08	1924,17	1,92	52,99
42	8,5	4,57	1,20	5,48	6,09	121,78	2630,43	2,63	55,62
43	8,8	4,73	1,20	5,67	6,30	126,08	2723,27	2,72	58,34
44	9,4	5,05	1,20	6,06	6,73	134,67	2908,95	2,91	61,25
45	5,9	3,17	1,20	3,80	4,23	84,53	1825,83	1,83	63,08
46	8,9	4,78	1,20	5,74	6,38	127,51	2754,22	2,75	65,83
47	6,9	3,71	1,20	4,45	4,94	98,86	2135,29	2,14	67,97
48	9,1	4,89	1,20	5,87	6,52	130,38	2816,11	2,82	70,78

49	9,6	5,16	1,20	6,19	6,88	137,54	2970,84	2,97	73,76
50	8,9	4,78	1,20	5,74	6,38	127,51	2754,22	2,75	76,51
51	9,6	5,16	1,20	6,19	6,88	137,54	2970,84	2,97	79,48
52	9,2	4,94	1,20	5,93	6,59	131,81	2847,06	2,85	82,33
53	8,1	4,35	1,20	5,22	5,80	116,05	2506,65	2,51	84,83
54	8,2	4,41	1,20	5,29	5,87	117,48	2537,60	2,54	87,37
55	8,8	4,73	1,20	5,67	6,30	126,08	2723,27	2,72	90,10
56	7,0	3,76	1,20	4,51	5,01	100,29	2166,24	2,17	92,26
57	7,3	3,92	1,20	4,71	5,23	104,59	2259,08	2,26	94,52
58	7,3	3,92	1,20	4,71	5,23	104,59	2259,08	2,26	96,78
59	11,2	6,02	1,20	7,22	8,02	160,46	3465,98	3,47	100,25
60	8,6	4,62	1,20	5,54	6,16	123,21	2661,38	2,66	102,91
61	9,6	5,16	1,14	5,90	6,56	131,17	2833,31	2,83	105,74
62	9,0	4,84	1,09	5,27	5,85	117,00	2527,28	2,53	108,27
63	10,0	5,37	1,03	5,55	6,17	123,37	2664,82	2,66	110,93
64			0,98						
65	Colheita		0,92						
66			0,87						
67			0,81						
68	Colheita		0,76						
69			0,70						
70			0,64						
71			0,59						
72			0,53						

Total	454,10	243,97	190,90	256,79	5135,77	110932,58	110,93		
--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	----------------	------------------	---------------	--	--

Obs.: dos dias 19 a 29 para uniformizar o estande foi utilizado uma lâmina bruta de 6,00 mm/dia para o tratamento.

Tabela 17. Manejo da irrigação do tratamento automático por temporizador

Dias	Eto (mm/dia)	Kc	Etc (mm/dia)	LB (mm/dia)	Tempo (min)	Volume (L)	Volume (m ³)	V. Acum.(m ³)
1	Plantio							
2	Casa de veg.							
3	Casa de veg.							
4	Casa de veg.							
5	Casa de veg.							
6	Casa de veg.							
7	Casa de veg.							
8	Casa de veg.							
9	Transplântio							
10	Transplântio							
11	5,99	0,21	1,26	1,40	27,95	603,79	0,60	0,60
12	5,99	0,21	1,26	1,40	27,95	603,79	0,60	1,21
13	5,99	0,21	1,26	1,40	27,95	603,79	0,60	1,81
14	5,99	0,21	1,26	1,40	27,95	603,79	0,60	2,42
15	5,99	0,21	1,26	1,40	27,95	603,79	0,60	3,02
16	5,99	0,21	1,26	1,40	27,95	603,79	0,60	3,62
17	5,99	0,21	1,26	1,40	27,95	603,79	0,60	4,23
18	5,99	0,21	1,26	1,40	27,95	603,79	0,60	4,83
19	5,99	0,21	1,26	6,00	120,00	2592,00	2,59	7,42
20	5,99	0,21	1,26	6,00	120,00	2592,00	2,59	10,01
21	5,99	0,21	1,26	6,00	120,00	2592,00	2,59	12,61
22	5,99	0,21	1,26	6,00	120,00	2592,00	2,59	15,20
23	5,99	0,71	4,25	6,00	120,00	2592,00	2,59	17,79
24	5,99	0,71	4,25	6,00	120,00	2592,00	2,59	20,38
25	5,99	0,71	4,25	6,00	120,00	2592,00	2,59	22,97
26	5,99	0,71	4,25	6,00	120,00	2592,00	2,59	25,57
27	5,99	0,71	4,25	6,00	120,00	2592,00	2,59	28,16
28	5,56	0,71	3,95	6,00	120,00	2592,00	2,59	30,75
29	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	32,65
30	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	34,54
31	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	36,43
32	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	38,33
33	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	40,22
34	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	42,12
35	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	44,01
36	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	45,91
37	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	47,80
38	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	49,70
39	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	51,59
40	5,56	0,71	3,95	4,39	87,72	1894,85	1,89	53,49
41	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	56,72
42	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	59,95
43	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	63,18
44	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	66,41
45	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	69,63
46	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	72,86
47	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	76,09
48	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	79,32

49	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	82,55
50	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	85,78
51	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	89,01
52	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	92,24
53	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	95,47
54	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	98,70
55	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	101,93
56	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	105,16
57	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	108,39
58	5,56	1,21	6,73	7,48	149,50	3229,25	3,23	111,61
59	4,98	1,10	5,45	6,06	121,18	2617,49	2,62	114,23
60	4,98	1,10	5,45	6,06	121,18	2617,49	2,62	116,85
61	4,98	1,10	5,45	6,06	121,18	2617,49	2,62	119,47
62	4,98	1,10	5,48	6,09	121,73	2629,44	2,63	122,10
63	4,98	1,10	5,48	6,09	121,73	2629,44	2,63	124,73
64								
65	Colheita							
66								
67								
68	Colheita							
69								
70								
71								
72								

Total	299,09	236,09	288,72	5774,37	124726,32	124,73		
--------------	---------------	---------------	---------------	----------------	------------------	---------------	--	--

Obs.: dos dias 19 a 29 para uniformizar o estande foi utilizado uma lâmina bruta de 6,00 mm/dia para o tratamento.

Programa em MATLAB® para controle automático de irrigação usando lógica fuzzy.

```
% Set/2004
```

```
% Inputs (out of the loop)
```

```
% ctr = 0;
```

```
% Inputs
```

```
vu = (W(1)+W(5))/2;
```

```
vl = (W(3)+W(7))/2;
```

```
tu = (T(2)+T(6))/2;
```

```
tl = (T(4)+W(8))/2;
```

```
if any(W<0 | W>1)
```

```
    u=find(W<0 | W>1)
```

```
    t=fix(clock);
```

```
    fid=fopen('d:\data\badata.m','a+');
```

```
    fprintf(fid,'Soil Moisture Sensor %4g is bad\n',u);
```

```
    fprintf(fid,'Time is %6g %3g %3g %4g %4g %4g\n',t);
```

```
    fclose(fid);
```

```
end
```

```
if any (T<0 | T>50)
```

```
    u=find(T<0 | T>50)
```

```
    t=fix(clock);
```

```
    fid=fopen('d:\data\badata.m','a+');
```

```
    fprintf(fid,'Temperature %6g is bad\n',u);
```

```
    fprintf(fid,'Time is %6g %3g %3g %4g %4g %4g\n',t);
```

```
    fclose(fid);
```

```
end
```

```
% vu=input('Differential Voltage (upper layer), dimensionless (0 - 1.00) =');
```

```
% vl=input('Differential Voltage (lower layer), dimensionless (0 - 1.00) =');
```

```
% tu=input('Temperature (upper layer) in celsius degrees =');
```

```
% tl=input('Temperature (lower layer) in celsius degrees =');
```

```

ru=(994*vu*5)/(5-(vu*5));
rl=(994*vl*5)/(5-(vl*5));

% ru=input('Resistance (upper layer) in ohms =');
% rl=input('Resistance (lower layer) in ohms =');

if ru < 0
    ru = 0;
elseif ru > 10000 % Maior valor de resistencia para calculos
    ru = 10000;
end

if rl < 0
    rl = 0;
elseif rl > 10000
    rl = 10000;
end

mu=(ru/1000)/(0,474483-0,0138697*tu+0,000147019*tu^2-0,01306*(ru/1000));
ml=(rl/1000)/(0,474483-0,0138697*tl+0,000147019*tl^2-0,01306*(rl/1000));

% mu=input('Soil Moisture (upper layer) in kPa (0 a 200) =');
% ml=input('Soil Moisture (lower layer) in kPa (0 a 200) =');

% Soil Moisture (shallow) Membership Functions
moiu = [0:1:200];
vwetu = mf_tri(moiu,[0 0 50],'n');
wetu = mf_tri(moiu,[0 50 100],'n');
medwu = mf_tri(moiu,[50 100 150],'n');
dryu = mf_tri(moiu,[100 150 200],'n');
vdryu = mf_tri(moiu,[150 200 200],'n');
moisu = [vwetu;wetu;medwu;dryu;vdryu];
% figure(1)
% plot(moiu,moisu);
% title('Soil Moisture Membership Functions')
% xlabel('Upper Layer Soil Moisture')
% ylabel('Membership')

% Soil Moisture (deep) Membership Functions
moil = [0:1:200];
vwetl = mf_tri(moil,[0 0 50],'n');
wetl = mf_tri(moil,[0 50 100],'n');

```

```

medwl = mf_tri(moil,[50 100 150],'n');
dryl = mf_tri(moil,[100 150 200],'n');
vdryl = mf_tri(moil,[150 200 200],'n');
moisl = [vwetl;wetl;medwl;dryl;vdryl];
% figure(2)
% plot(moil,moisl);
% title('Soil Moisture Membership Functions')
% xlabel('Lower Layer Soil Moisture')
% ylabel('Membership')

% Fuzzy control Membership Functions
irr = [0:0.01:1];
vli = mf_tri(irr,[0 0 0.25],'n');
lowi = mf_tri(irr,[0 0.25 0.5],'n');
medi = mf_tri(irr,[0.25 0.5 0.75],'n');
highi = mf_tri(irr,[0.5 0.75 1],'n');
vhi = mf_tri(irr,[0.75 1 1],'n');
irri = [vli;lowi;medi;highi;vhi];
% figure(3)
% plot(irr,irri);
% title('Relative Humidity Membership Functions')
% xlabel('Relative Humidity')
% ylabel('Membership')

% Degree of Fullfillments of Antecedent MFs
DOF1=interp1(moiu',moisu',mu)';
DOF2=interp1(moil',moisl',ml)';

% Fuzzy relation operation AND
antecedent_DOF = [min(DOF1(1), DOF2(1))
min(DOF1(1), DOF2(2))
min(DOF1(1), DOF2(3))
min(DOF1(1), DOF2(4))
min(DOF1(1), DOF2(5))
min(DOF1(2), DOF2(1))
min(DOF1(2), DOF2(2))
min(DOF1(2), DOF2(3))
min(DOF1(2), DOF2(4))
min(DOF1(2), DOF2(5))
min(DOF1(3), DOF2(1))
min(DOF1(3), DOF2(2))

```

```

min(DOF1(3), DOF2(3))
min(DOF1(3), DOF2(4))
min(DOF1(3), DOF2(5))
min(DOF1(4), DOF2(1))
min(DOF1(4), DOF2(2))
min(DOF1(4), DOF2(3))
min(DOF1(4), DOF2(4))
min(DOF1(4), DOF2(5))
min(DOF1(5), DOF2(1))
min(DOF1(5), DOF2(2))
min(DOF1(5), DOF2(3))
min(DOF1(5), DOF2(4))
min(DOF1(5), DOF2(5))];

```

```

% Consequent Definitions

```

```

consequent = [irri(1,:)

```

```

irri(1,:)

```

```

irri(2,:)

```

```

irri(3,:)

```

```

irri(4,:)

```

```

irri(1,:)

```

```

irri(2,:)

```

```

irri(2,:)

```

```

irri(3,:)

```

```

irri(3,:)

```

```

irri(2,:)

```

```

irri(3,:)

```

```

irri(3,:)

```

```

irri(4,:)

```

```

irri(4,:)

```

```

irri(3,:)

```

```

irri(3,:)

```

```

irri(4,:)

```

```

irri(4,:)

```

```

irri(5,:)

```

```

irri(3,:)

```

```

irri(3,:)

```

```

irri(4,:)

```

```

irri(5,:)

```

```

irri(5,:)]];

```

```

Consequent = product(consequent,antecedent_DOF);

```

```

% figure(4)

```

```

% plot(irr,Consequent)

```

```

% axis([min(irr) max(irr) 0 1.0])
% title('Consequent of Fuzzy Rules')
% xlabel('Irrigation')
% ylabel('Membership')

% Aggregation
aggregation = max(Consequent);
% figure(5)
% plot(irr,aggregation)
% axis([min(irr) max(irr) 0 1.0])
% title('Aggregation of Fuzzy Rule Outputs')
% xlabel('Irrigation')
% ylabel('Membership')

% Defuzzification
output=centroid(irr,aggregation);
% c_plot(irr,aggregation,output,'Crisp Output Value for Irrigation')
% axis([min(irr) max(irr) 0 1.0])
% xlabel('Irrigation');

% Fuzzy control value
ig =output;

% Fuzzy Control
if ig < 0.2
valve1 = 0;
else
valve1 = 1;
end

ig
valve1

erroant=erro;

if valve1==0 & ctr~=0
ctr=0;
control=1;
t=fix(clock);
fid=fopen('d:\data\contdat.txt','a+');
fprintf(fid,'ctr =%3g and ',ctr);
fprintf(fid,'time is %6g %3g %3g %4g %4g %4g\n',t);
fclose(fid);

```

```
elseif valve1==1 & ctr~=1
    ctr=1;
    control=1;
    t=fix(clock);
    fid=fopen('d:\data\contdat.txt','a+');
    fprintf(fid,'ctr =%3g and ',ctr);
    fprintf(fid,'time is %6g %3g %3g %4g %4g %4g\n',t);
    fclose(fid);
end
```

Projeto de Irrigação de Melão

Cultura: melão híbrido AF 646 ou AF 648

Espaçamento do plantio: 2,0 x 0,5 m

Fileiras simples

Sistema de irrigação: gotejo

Vazão do emissor: 2,4l/h

Pressão de serviço 15mca (147kpa)

Espaçamento do sistema: 2,0 x 0,5 m

Lâmina líquida: 7,14mm/dia

Eficiência do sistema de irrigação: 90%

Lâmina bruta: 7,94mm/dia

Tempo de operação do emissor

$$T = \frac{E_1 x E_2 x L_b x F_s}{q x n}; \text{ onde:}$$

T = Tempo de operação do emissor, em h;

E₁ e E₂ = Espaçamento da cultura, em m;

L_b = Lâmina bruta a aplicar, em mm/dia;

F_s = Fator de sombreamento, em decimais;

q = Vazão do emissor, em l/h;

n = Número de emissor por planta.

$$T = \frac{2,0 x 0,5 x 7,94 x 1,0}{2,3 x 1} = 3,46h$$

Definição da vazão da linha lateral - Ø16 mm (dint = 16,1mm)

$$Ql = \frac{c}{e} x q, \text{ onde:}$$

c = Comprimento da linha lateral, em m;

e = Espaçamento entre emissores na linha lateral, em m;

q = Vazão do emissor, em l/h.

$$Ql = \frac{12}{0,5} x 2,3 = 56l/h; Ql = 1,54 x 10^{-5} m^3/s$$

Velocidade na linha lateral

$$V = \frac{4 \times Q}{\pi \times D^2}, \text{ onde:}$$

v = Velocidade na linha lateral, em m/s;

Q = Vazão na linha lateral, m³/s;

D = Diâmetro da linha lateral, em m;

$\pi = 3,14$

$$V = \frac{4 \times 1,54 \times 10^{-5}}{3,14 \times (0,0161)^2} = 0,08 \text{ m/s}$$

Perda de carga na linha lateral

$$H_{fc} = 0,004093 \times K_s \times L \times \frac{(Q)^{1,9}}{(D)^{4,9}} \times F_{24}$$

Fórmula da perda de carga de Scobey, em que:

H_{fc} = Perda de carga contínua, em m;

K_s = Coeficiente de atrito (0,32 para materiais plásticos);

L = Comprimento da linha lateral, em m;

Q = Vazão da linha lateral, em m³/s;

D = Diâmetro da linha lateral, em m;

F_n = Coeficiente de redução em função do número de saídas (F₂₄=0,352).

$$H_{fc} = 0,004093 \times 0,32 \times 13,5 \times \frac{(1,54 \times 10^{-5})^{1,9}}{(0,0161)^{4,9}} \times 0,352 = 0,0027 \text{ m}$$

$$H_{fl} = K_1 \frac{(V)^2}{2 \times g}$$

H_{fl} = Perda de carga localizada, em mca;

K₁ = Coeficiente da perda correspondente à peça especial considerada;

V = Velocidade média do fluxo imediatamente à jusante da peça, em m/s;

g = Aceleração da gravidade (9,8 m/s²).

$$H_{fl} = 20 \frac{(0,08)^2}{2 \times 9,81} = 0,0065 \text{ m/m}$$

Definição da vazão da linha de distribuição - Ø20 mm ou 1/2" (dint = 20 - 2x1,2=17,6 mm)

$Q_d = 6 \times Q_l$, onde:

Q_d = Vazão da linha distribuição, em m^3/s ;

Q_l = Vazão da linha lateral, em m^3/s .

$$Q_d = 6 \times 56 = 336 \text{ l/h}; Q_d = 9,4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = \frac{4 \times Q}{\pi \times D^2}, \text{ onde:}$$

v = Velocidade na linha de distribuição, em m/s ;

Q = Vazão na linha de distribuição, m^3/s ;

D = Diâmetro da linha de distribuição, em m .

$\pi = 3,14$

$$V = \frac{4 \times 9,4 \times 10^{-5}}{3,14 \times (0,0176)^2} = 0,38 \text{ m/s}$$

$$H_{fc} = 0,004093 \times K_s \times L \times \frac{(Q)^{1,9}}{(D)^{4,9}} \times F_6$$

Fórmula da perda de carga de Scobey, em que:

H_{fc} = Perda de carga contínua, em m ;

K_s = Coeficiente de atrito (0,32 para materiais plásticos);

L = Comprimento da linha de distribuição, em m ;

Q = Vazão da linha de distribuição, em m^3/s ;

D = Diâmetro da linha de distribuição, em m ;

F_n = Coeficiente de redução em função do número de saídas ($F_6=0,381$).

$$H_{fc} = 0,004093 \times 0,32 \times 38 \times \frac{(9,4 \times 10^{-5})^{1,9}}{(0,0176)^{4,9}} \times 0,381 = 0,16 \text{ m}$$

$$H_{fl} = K_1 \frac{(V)^2}{2 \times g}$$

H_{fl} = Perda de carga localizada, em mca;
 K₁ = Coeficiente da perda correspondente à peça especial considerada;
 V = Velocidade média do fluxo imediatamente à jusante da peça, em m/s;
 g = Aceleração da gravidade (9,8 m/s²);

$$H_{fl} = 20 \frac{(0,38)^2}{2 \times 9,81} = 0,15 \text{ m/m}$$

Definição da vazão da linha principal - Ø25 mm ou ¾" (dint = 25 – 2x1,2 = 22,61 mm)

Q_p = 3 x Q_d, onde:
 Q_p = Vazão da linha principal, em m³/s;
 Q_d = Vazão da linha de distribuição, em m³/s;

$$Q_p = 3 \times 336 = 1008 \text{ l/h}; Q_p = 2,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s};$$

$$V = \frac{4 \times Q}{\pi * D^2}, \text{ onde:}$$

v = Velocidade na linha principal, em m/s;
 Q = Vazão na linha principal, m³/s;
 D = Diâmetro da linha principal, em m;
 π = 3,14

$$V = \frac{4 \times 2,8 \times 10^{-4}}{3,14 \times (0,02261)^2} = 0,70 \text{ m/s}$$

$$H_{fc} = 0,004093 \times K_s \times L \times \frac{(Q)^{1,9}}{(D)^{4,9}} \times F_3$$

Fórmula da perda de carga de Scobey, em que:

H_{fc} = Perda de carga continua, em m;
 K_s = Coeficiente de atrito (0,32 para materiais plásticos);
 L = Comprimento da linha principal, em m;
 Q = Vazão da linha principal, em m³/s;
 D = Diâmetro da linha principal, em m;
 F_n = Coeficiente de redução em função do número de saídas (F₃=0,442).

$$H_{fc} = 0,004093 \times 0,32 \times 60 \times \frac{(2,8 \times 10^{-4})^{1,9}}{(0,0226)^{4,9}} \times 0,442 = 0,72 \text{ m}$$

$$H_{fl} = K_1 \frac{(V)^2}{2 \times g}$$

H_{fl} = Perda de carga localizada, em mca;

K_1 = Coeficiente da perda correspondente à peça especial considerada;

V = Velocidade média do fluxo imediatamente à jusante da peça, em m/s;

g = Aceleração da gravidade (9,8 m/s²);

$$H_{fl} = 20 \frac{(0,72)^2}{2 \times 9,81} = 0,52 \text{ m/m}$$

Cálculo da altura manométrica

	mca
Pressão de serviço do emissor.	15,0000
Perda de carga na linha lateral.	0,0027
Perda de carga na linha derivada	0,1600
Perda de carga na linha principal	0,7200
Perda de carga na filtragem	5,0000
Desnível geométrico	1,0000
Altura de sucção	3,0000
Perda de carga localizada	0,6765
total	25,5392

Cálculo da potência do motor

$$H_{total} = 26 \text{ mca}$$

$$Q_{total} = 1,008 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$CV = \frac{H_{total} \times Q_{total}}{N \times 2,7}, \text{ onde:}$$

CV = Consumo no eixo da bomba em CV;

Q_{total} = Vazão total do sistema em m³/s;

H_{total} = Altura manométrica total em mca;

N = Rendimento da bomba em %;

$$CV = \frac{26 \times 1,008}{70 \times 2,7} = 0,14 \times 1,1 = 0,16 \text{ CV}$$