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

**Automação da leitura do medidor Speedy e utilização em programa de manejo
de irrigação**

Tiago Cappello Garzella

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

Piracicaba
2011

Tiago Cappello Garzella
Engenheiro Agrônomo

Automação da leitura do medidor Speedy e utilização em programa de manejo de irrigação

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

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

**Piracicaba
2011**

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

Garzella, Tiago Cappello

Automação da leitura do medidor Speedy e utilização em programa de manejo de irrigação / Tiago Cappello Garzella. - - Piracicaba, 2011.
100 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Balanço hídrico 2. Irrigação - Gerenciamento - Manejo 3. Tecnologia agrícola
Umidade do solo I. Título

CDD 631.7
G245a

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, assim como minha vida em gratidão:

aos meus pais, Aldo Garzella e Marta Maria Camargo Cappello Garzella;
aos meus irmãos, Mariana Cappello Garzella e Rafael Cappello Garzella;
à minha esposa, Fabiana Aurora Colombo Garzella.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelos seus dons em minha vida e por me permitir encontrá-lo em tantas pessoas e situações durante este período de trabalho.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) pela oportunidade de realização dos cursos de graduação e doutoramento.

Ao orientador, amigo e professor Tarlei Arriel Botrel, bem como sua família, pela partilha de vida, paciência, auxílio, conselho e carinho, que muito contribui para minha formação profissional e humana.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores José Paulo Molin e Rubens Duarte Coelho, pelos valiosos conselhos e orientações.

Ao professor Raul Machado Neto, que por seus exemplos me incentivou a iniciar a carreira científica, ainda quando integrei o GIC.

A Poliana Rocha D'Almeida Mota, por grande auxílio na revisão do trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP, pelas aulas que fundamentaram minha formação acadêmica.

Aos funcionários do Departamento, especialmente nas pessoas de Osvaldo, Gilmar, Áureo, Juarez, Hélio, Luiz, Beatriz, Sandra e Fernanda, por toda ajuda e disposição.

À Davilmar, por tamanha atenção e dedicação aos pós-graduandos do curso.

Ao meu grande colega, companheiro e amigo Robson André Armindo, pela convivência, paciência e amizade.

Aos amigos de sala Rogério, Ceres, Tadeu, Alexsandro, Wanderley, Antonio e Marinaldo e aos demais amigos da pós-graduação: Adalberto, Allan, Basalto, Cícero, Fabiana, Garotinho, João Batista, João Lélis, Lucas Faria, Lucas Vellame, Marco Rosa, Marconi, Pabblo, Pedro Róbinson, Pedro Giongo, Ronaldo, Sérgio e Valfísio, pela troca de experiências e aprendizados.

Aos grandes amigos e professores do ensino básico, tia Bete, tia Maibi, Nanci e Zé Renato, por serem exemplo de dedicação à “missão” pedagógica.

Aos amigos do ensino público fundamental e médio, especialmente a Fabio Pereira Nunes e Fabio Henrique de Oliveira, por se fazerem tão presentes na minha iniciação escolar.

Aos amigos do SENAI Roberto Mange, especialmente a Milton, Renê, Michael e Julio.

Aos amigos e irmãos de Santa Bárbara d'Oeste, pelas lágrimas e sorrisos compartilhados, pelo abraço que conforta e por serem essenciais em minha vida.

*“Para chegares a saborear tudo,
não queiras ter gosto em coisa alguma.*

*Para chegares a possuir tudo,
não queiras possuir coisa alguma.*

*Para chegares a ser tudo,
não queiras ser coisa alguma.*

*Para chegares a saber tudo,
não queiras saber coisa alguma.*

*Para chegares ao que não sabes,
hás de ir por onde não sabes.*

*Para chegares ao que não és,
hás de ir por onde não és.*

*Porque para vir de todo ao tudo,
hás de negar-te de todo em tudo.*

*E quando vieres a tudo ter,
hás de tê-lo sem nada querer.*

*Porque se queres ter alguma coisa em tudo,
não tens puramente em Deus teu tesouro.”*

São João da Cruz

Subida do Monte Carmelo, São Paulo: Paulus, 2010. 429 p.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE SÍMBOLOS	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 DESENVOLVIMENTO.....	23
2.1 Manejo da irrigação	23
2.1.1 Manejo da irrigação baseado nas condições do solo	24
2.1.2 Manejo da irrigação baseado nas condições da cultura.....	25
2.1.3 Manejo da irrigação baseado nas condições atmosféricas.....	26
2.2 Umidade do solo	27
2.3 Métodos para determinação de umidade do solo.....	29
2.4 Método do carbureto de cálcio	30
2.5 Método do carbureto de cálcio: demonstração	33
2.6 O aparelho Speedy.....	38
2.7 Eletrônica na agricultura.....	39
2.7.1 Microcontroladores.....	40
2.7.2 Basic Step	41
2.7.3 Conversor analógico-digital (A/D).....	42
2.8 Análise de sensibilidade	43
2.9 Análise de correlação e análise de erro	44
2.10 Material e Métodos.....	47
2.10.1 Localização e etapas do trabalho	47
2.10.2 Sistemas e estruturação.....	47
2.10.3 Descrição dos equipamentos e componentes.....	48
2.10.3.1 Medidor de umidade Speedy	49
2.10.3.2 Conversor analógico-digital (A/D).....	49
2.10.3.3 Sensor de Pressão	49
2.10.3.4 Microcontrolador Basic Step I.....	50

2.10.3.5 Microcontrolador Basic Step M8	50
2.10.3.6 Driver para memória flash (pen drive)	51
2.10.4 Descrição das linguagens de programação utilizadas.....	51
2.10.4.1 Linguagem Basic	51
2.10.4.2 Linguagem Pascal.....	52
2.10.5 Análise de sensibilidade da equação obtida	52
2.10.6 Metodologia para avaliação da medição de umidade via Speedy	53
2.10.7 Metodologia para avaliação do dispositivo em campo.....	54
2.11 Resultados e Discussão.....	56
2.11.1 Análise de sensibilidade da equação obtida	56
2.11.2 Avaliação da medição de umidade via Speedy	57
2.11.3 Avaliação do dispositivo em campo.....	59
2.11.4 Primeiro sistema	61
2.11.5 Segundo sistema	63
2.11.6 Terceiro sistema.....	65
2.11.7 Quarto sistema	70
3 CONCLUSÃO.....	75
REFERÊNCIAS	77
ANEXOS.....	83

RESUMO

Automação da leitura do medidor Speedy e utilização em programa de manejo de irrigação

No contexto atual, no qual os recursos hídricos tornam-se cada vez mais limitantes, a utilização da água pela agricultura precisa ser mais eficiente visando à manutenção dos níveis atuais de produtividade. Uma vez implantado o equipamento de irrigação, o produtor necessita de uma estratégia de gerenciamento que defina o momento certo e a quantidade de água adequada para atender às necessidades hídricas da cultura. Uma ferramenta muito utilizada para esse fim é o balanço hídrico, pelo qual são contabilizadas as entradas e saídas de água do sistema, permitindo que se obtenha a quantidade a ser aplicada visando à utilização racional do recurso e o desenvolvimento adequado da cultura. Entretanto, muitas vezes o acompanhamento da quantidade de água disponível às plantas somente pelo balanço hídrico pode apresentar erros cumulativos, o que torna importante, a cada determinado intervalo de tempo, realizar-se medições da umidade do solo para fins de ajuste. O medidor Speedy, baseado no processo de formação do gás acetileno a partir da reação da água com carbureto de cálcio, pode ser utilizado de forma conjugada ao balanço hídrico por fornecer resultados rápidos com adequada precisão, ser portátil e de fácil manuseio. Assim, o objetivo deste trabalho foi automatizar a leitura de um aparelho Speedy, integrando-o a um programa desenvolvido de manejo da irrigação. Foram desenvolvidos quatro sistemas baseados na leitura automatizada da umidade pelo aparelho, cada um com diferente grau de complexidade e aplicação. Dois testes foram realizados com os sistemas, o primeiro em laboratório e o segundo em campo, nos quais determinações de umidade pelo Speedy e pelo método gravimétrico foram comparadas. Os resultados foram submetidos a análise de correlação e regressão, determinando-se os índices de precisão (r) e exatidão (d). Tanto nos testes em laboratório quanto no em campo, os índices obtidos foram satisfatórios. Os sistemas funcionaram de forma adequada, constituindo-se como ferramentas de auxílio para o gerenciamento da irrigação.

Palavras-chave: Gerenciamento de irrigação; Umidade do solo; Balanço hídrico; Microcontrolador

ABSTRACT

Automation of the reading of a Speedy moisture tester and use in irrigation management software

As water supplies become limited, agricultural water use needs to become more efficient to maintain current productivity levels. Matching the amount and rate of water application to specific soil and plant conditions, the efficiency of irrigations system can be increased. An easy way to accomplish this is using the water balance. However, the monitoring of available water content only by the water balance can generate cumulative errors, which should be removed by soil moisture determinations. The Speedy moisture tester can be used in this situation, considering that it is portable, shows the results quickly and have good precision. The visualization of its results through tables, though, reduces the functionality of its use and can confer less precision to the measurements. So, the objective of this work was to automate the equipment readings and to integrate it in water balance software. It was developed four systems to do this process, using a microcontroller. Two tests, one in the laboratory e other in the field, were realized to compare the determinations by Speedy and by gravimetric method. The systems resulted excellent precision (r) and accuracy (d) index, and seems to become an important tool for irrigation management.

Keywords: Soil moisture; Water balance; Electronic

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Carbureto de cálcio.	30
Figura 2 – Lanterna de carbureto (a) e diagrama (b).	31
Figura 3 – Medidor de umidade Speedy.	49
Figura 4 – Conversor analógico-digital ADC 0832.	49
Figura 5 – Sensor de pressão.	50
Figura 6 – Basic Step I.	50
Figura 7 – Basic Step M8.	51
Figura 8 – Driver para memória flash (<i>pen drive</i>).	51
Figura 9 – Área do experimento, com os pontos de amostragem.	55
Figura 10 – Gráfico de análise de sensibilidade, que relaciona a variação percentual em cada variável e sua implicação no valor de umidade resultante.	56
Figura 11 – Relação entre a umidade determinada pelo Speedy com manômetro e conversão por tabela <i>versus</i> método padrão (a) e entre Speedy com manômetro e conversão pela equação obtida <i>versus</i> método padrão, com o ensaio realizado em laboratório.	58
Figura 12 – Relação entre a umidade determinada pelo Speedy acoplado ao dispositivo de automação <i>versus</i> umidade determinada pelo método padrão, para o ensaio realizado em laboratório.	59
Figura 13 – Relação entre a umidade determinada pelo Speedy <i>versus</i> a umidade determinada pelo método padrão, para o ensaio realizado em campo.	60
Figura 14 – Conexão do sensor de pressão com o cilindro do aparelho.	61
Figura 15 – Visão geral do interior do dispositivo eletrônico.	62
Figura 16 – Diagrama de blocos do primeiro sistema.	62
Figura 17 – Diagrama de blocos do segundo sistema.	63
Figura 18 – Estruturação do segundo sistema: dispositivo construído, microcomputador e conexões.	64
Figura 19 – Programa desenvolvido em Qbasic para o segundo sistema, em funcionamento.	65
Figura 20 – Tela principal do programa desenvolvido para o terceiro sistema.	67
Figura 21 – Tela de configuração dos parâmetros da equação do Speedy, para o terceiro sistema.	68

Figura 22 – Tela de configuração dos parâmetros para o cálculo da lâmina de irrigação, para o terceiro sistema.	68
Figura 23 – Tela para configuração do arquivo de registro, do terceiro sistema.	69
Figura 24 – Diagrama de blocos do quarto sistema.	70
Figura 25 – Dispositivo construído para o quarto sistema.	71
Figura 26 – Tela principal do programa de balanço hídrico, desenvolvido para o quarto sistema.	72
Figura 27 – Detalhe do menu de contexto Ferramentas, do programa de balanço hídrico desenvolvido para o quarto sistema.	72

LISTA DE SÍMBOLOS

e_s – Pressão de saturação de vapor de água

e_a – Pressão parcial de vapor de água

CAD – Capacidade de armazenamento de água

β_0 e β_1 – Parâmetros de um modelo de correlação linear

ΔE – Taxa de variação da entrada dos dados, para análise de sensibilidade

ΔS – Taxa de variação da resposta do modelo, para análise de sensibilidade

ε – Erro aleatório

θ_{cc} – Umidade do solo, com base em volume na capacidade de campo

θ_{pmp} – Umidade do solo, com base em volume no ponto de murcha permanente

ρ_a – Massa específica da água

ρ_s – Massa específica do solo

1 INTRODUÇÃO

Na agricultura atual, dá-se grande importância aos sistemas de irrigação, os quais são responsáveis por significativos incrementos na produtividade das culturas, além de permitirem a exploração de áreas cujo elevado potencial produtivo é limitado pelo insuficiente regime hídrico. Em função dos avanços tecnológicos observados tanto no âmbito das indústrias que fabricam equipamentos para irrigação, quanto na área do conhecimento agrônomo sobre as relações solo-água-planta, os processos de tomada de decisão visando uma otimização da prática da irrigação tornam-se cada vez mais dependentes de informações (FRIZZONE e BOTREL, 1996).

Define-se manejo da irrigação como o processo de determinação do momento em que se deve realizar cada irrigação e da quantidade de água que, por esta, deve ser aplicada (CAMPBELL apud GUIMARÃES, 1993). Souza (1992), afirma que uma das principais razões que condicionam baixas eficiências em sistemas de irrigação é a falta de atenção dada ao manejo após a fase de implantação dos projetos.

O gerenciamento inadequado do sistema de irrigação pode promover, além de desperdício de água, alto gasto com energia e maior incidência de pragas e doenças, devido à exposição da cultura a condições fitossanitárias adversas (PRENGER et al., 2005).

Uma vez implantado o equipamento de irrigação, o produtor necessita de uma estratégia de manejo de água que defina, em bases racionais, o momento certo e a quantidade de água adequada para atender às necessidades hídricas da cultura (SILVA et al. apud OLIVEIRA, 2000).

Sabe-se que, para a resolução desse problema, é comum a utilização de planilhas de balanço hídrico, pelas quais, a partir de uma estimativa da quantidade de água que entra e que sai do sistema solo-planta, torna-se possível obter a necessidade de água a ser aplicada ao solo para permitir, à cultura, um desenvolvimento satisfatório.

Entretanto, o acompanhamento do volume de água disponível às plantas pelo balanço hídrico, na prática é difícil, dispendioso e pode apresentar erros cumulativos, o que torna importante, a cada determinado intervalo de tempo, realizar-se medições da umidade do solo para fins de ajuste da respectiva planilha de balanço hídrico.

Silva (2005), estudando o manejo da irrigação com o balanço hídrico para a cultura do café, conclui que: a medição da chuva deve conter apropriado número de repetições; a irrigação

pode introduzir significativa variabilidade no sistema; a evapotranspiração calculada tem coeficientes de variação muito altos e; a água armazenada no solo é o fator que mais contribui na propagação dos erros.

Nesse contexto, o monitoramento da quantidade de água disponível no solo às culturas mostra-se essencial para otimização do gerenciamento da irrigação, vindo a exigir métodos e instrumentos de determinação da umidade do solo cada vez mais eficientes (HEERMANN et al., 2002).

Jensen et al. apud Oliveira (2000), já relatavam que o potencial para se melhorar o manejo da irrigação aumentou substancialmente a partir da década de 1990 devido, entre outros fatores, principalmente à disponibilidade comercial de instrumentos de medição da umidade do solo para determinação de quando irrigar. Verifica-se a maior eficiência que pode ser agregada aos sistemas de manejo da irrigação, quando acoplado a estes, um equipamento de medição de umidade.

Nota-se, porém, a necessidade desse equipamento além de fornecer os resultados de umidade de forma rápida, possuir adequada precisão e possibilidade de integração a um sistema computadorizado, o qual já processe seus resultados de forma a elaborar um manejo da irrigação. São essas as exigências que permitem a utilização de um medidor de umidade tipo Speedy, para integração a um sistema de manejo da irrigação.

O princípio químico que fundamenta o medidor Speedy deriva do processo de formação e quantificação do acetileno a partir da reação da água com o carbureto de cálcio. Industrialmente, a obtenção de acetileno, alcino de maior importância econômica especialmente pela elevada energia liberada durante sua combustão, se dá por dois processos, sendo um deles, o que principia o método estudado. Parks (1941) já havia desenvolvido um método baseado nesse princípio para se determinar a umidade de grãos e forragens.

Também conhecido como método do carbureto de cálcio, esse princípio consiste em se misturar num cilindro, o carbureto de cálcio com o material a ser analisado, observando-se a formação do gás acetileno. Nesse processo, a água contida no material de análise promove a hidrólise do carbureto, fazendo com que dois átomos de hidrogênio substituam o cálcio em sua estrutura vindo a originar, por consequência, o acetileno, segundo esquema que segue:

Estabelece-se assim, uma relação estequiométrica entre a quantidade de água participante como reagente e a quantidade de acetileno obtido como produto. A partir dessa relação, onde cada mol de acetileno corresponde a dois mols de água, torna-se possível determinar o teor de água de uma amostra através da quantificação do acetileno formado.

Sendo o acetileno um gás a temperatura ambiente, sua quantificação é realizada medindo-se a pressão exercida por este sobre o interior do cilindro, fazendo-se uso de um manômetro.

Com o emprego de tabelas, o valor de pressão obtido é convertido em porcentagem de água contida na amostra, concluindo o processo de quantificação. Comumente, durante a realização das leituras, encontra-se dificuldade em obter corretamente a pressão, devido às divisões da escala do manômetro e à freqüente ausência de correspondência entre o valor de pressão lido e os valores existentes na tabela de conversão, o que acaba por exigir interpolação de valores.

Assim sendo, a primeira etapa da pesquisa consistiu na automação das leituras do Speedy, com os intuitos de otimizar o manuseio do equipamento, obter maior precisão, integrar o aparelho a programas de manejo de irrigação e permitir a construção de medidores de umidade fundamentados no método do carbureto de cálcio, com o uso de outros recipientes.

A segunda etapa deste trabalho objetivou o desenvolvimento de um programa de manejo da irrigação, baseado no balanço hídrico, para integrar medições de umidade do Speedy, variáveis relacionadas ao sistema produtivo, ao clima e ao sistema de irrigação.

O programa é capaz de, alimentado com valores referentes ao sistema de irrigação e produtivo, identificar o momento e a quantidade de água a ser aplicada.

Espera-se, dessa forma, ter-se disponibilizado uma ferramenta de otimização do gerenciamento de irrigação.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Manejo da irrigação

A água foi o primeiro insumo a ser gerenciado dentro de um sistema produtivo, com registros arqueológicos dessa atividade de mais de oito mil anos, na região do rio Nilo, na Mesopotâmia, e perto de outros rios na China, Índia e América (SADLER et al., 2002). A água é para a agricultura, atividade responsável pela maior utilização desse recurso natural, fator de produção essencial (RIJSBERMAN, 2006).

Sadler et al. (2005) alertam que a iminente escassez dos recursos hídricos requer uma utilização cada vez mais eficiente da água nos sistemas agrícolas. Dukes e Perry (2006) citam que com a disponibilidade hídrica tornando-se limitante, são fundamentais esforços no sentido de se adequar a quantidade de água aplicada à real necessidade dos sistemas produtivos.

Além de contribuir com a escassez da água, a irrigação em excesso pode ocasionar a contaminação de corpos d'água pela lixiviação e o carregamento de nutrientes e partículas, aumentando tanto o custo do sistema produtivo como a degradação do ambiente (OTTMAN e POPE, 2000). Em contrapartida, quantidades insuficientes de água podem causar estresse hídrico e baixa produtividade das culturas (AL-KUFAISHI et al., 2006).

Assim, o conhecimento da interação entre fatores da cultura, do clima e do solo constitui-se em aspecto importante na agricultura irrigada para que haja um adequado gerenciamento da irrigação.

Segundo Hernandez (1994), existem várias metodologias e critérios para estabelecer programas de irrigação, que vão desde simples turnos de rega a completos esquemas de integração do sistema solo-água-planta-atmosfera. Entretanto, reconhece-se que, ao agricultor, devem ser fornecidas técnicas simples, mas com precisão suficiente para possibilitarem, no campo, a determinação criteriosa do momento e da quantidade de água a ser aplicada.

Existem três processos fundamentais de se gerenciar a irrigação: baseados nas condições de água do solo, nas condições atmosféricas e nas condições de água nas plantas. A conjugação dos processos via atmosfera e via solo também é frequente (PEREIRA et al., 2002).

2.1.1 Manejo da irrigação baseado nas condições do solo

Souza (1989) afirma que o solo é o reservatório de água para as plantas, aberto para a atmosfera e para os horizontes mais profundos do perfil, e sendo reabastecido pela chuva, lençol freático ou irrigação. A capacidade de retenção de água ou capacidade de água disponível do solo (CAD) está diretamente relacionada à sua matriz e a distribuição espacial dos poros. Esta interação sofre influência de diversos fatores, dentre os quais citam-se principalmente a evaporação e a transpiração, o tipo de cultura e as práticas culturais estabelecidas, a profundidade do perfil e impedimentos à drenagem (PEREIRA et al., 2002).

Reichardt (1978) comenta que a dinâmica da água no solo é complexa, variando de situação para situação, dependendo de inúmeros fatores como heterogeneidade do perfil de solo, tipo de planta, desenvolvimento e atividades radiculares, condições atmosféricas, entre outras.

Do ponto de vista da disponibilidade da água para as plantas, definiu-se a CAD correspondendo à quantidade de água retida entre os potenciais de -33 kPa (capacidade de campo, θ_{cc}) e -1,5 MPa (ponto de murcha permanente, θ_{PMP}). De forma geral, as plantas não conseguem retirar água de solos sob potenciais menores que -1,5 MPa. Definiu-se então, o θ_{PMP} como uma característica física de um solo, sendo igual ao valor da umidade do solo quando o potencial da água é -1,5 MPa. Se a umidade do solo chegar a esse ponto, a cultura terá sua produção prejudicada.

Em contrapartida, proporcionando-se ao solo uma quantidade de água maior que a CAD, pode-se, além de causar desperdício, diminuir a aeração do solo de modo a prejudicar o desenvolvimento da cultura.

Portanto: $CAD = (\theta_{cc} - \theta_{PMP}) \text{ cm /cm}^3$. Considerando θ_{cc} e θ_{PMP} constantes e independentes da profundidade, a água disponível de uma camada de profundidade L será: $CAD = L (\theta_{cc} - \theta_{PMP})$.

No caso do gerenciamento da irrigação, o conceito de capacidade de água disponível tem sido utilizado com frequência e relativo sucesso. Isto decorre da necessidade de se possuir um critério para cálculo da quantidade de água a ser fornecida a uma cultura, para efeito de projeto, previsão de necessidades e dimensionamento de sistemas de irrigação (BERNARDO, 1995).

Reichardt (1988) também afirma que devido à facilidade encontrada na determinação em laboratório da umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, este

tem sido um critério bastante utilizado e com resultados consistentes, principalmente, em projetos de irrigação.

Com base na determinação da condição de umidade do solo, tendo em vista a CAD e utilizando-se de fatores culturais, torna-se possível identificar a necessidade da irrigação e a quantidade de água a ser aplicada (PEREIRA et al., 2002).

2.1.2 Manejo da irrigação baseado nas condições da cultura

A dificuldade de se estimar ou medir a quantidade de água no solo tem criado metodologias empíricas para a medição deste parâmetro, apresentando controvérsias quanto a sua generalização para diferentes tipos de solo. Atualmente a disponibilidade de água do solo às plantas é vista de maneira dinâmica, podendo variar de situação para situação para o mesmo solo e mesma cultura.

Toda vez que o fluxo de água do solo para a raiz é de uma intensidade tal que supre a demanda de água da planta e da atmosfera, a água é disponível. A planta entra em déficit de água ou murcha, quando o fluxo deixa de suprir esta demanda. Este conceito de disponibilidade de água é bastante amplo, e mostra que qualquer fator capaz de interagir com a mobilidade da água afeta sua disponibilidade.

Assim, uma planta em um solo com baixo potencial de água pode não sofrer dano sob condições atmosféricas brandas. Nestas condições, apesar da condutividade hidráulica do solo ser muito baixa, a demanda evaporativa da atmosfera ainda é suprida pelo pequeno fluxo de água no solo. Por outro lado, sob condições atmosféricas intensas, plantas em solo com água sob potenciais altos podem começar a murchar.

Da mesma forma, métodos que estimam o momento e a quantidade da aplicação de água baseado nas condições do clima estão sujeitos a erros significativos.

Silva (2005), estudando os componentes do balanço hídrico, relata que as medidas de precipitação mostraram significativa variabilidade entre as repetições para uma mesma chuva. Os autores também discorrem sobre a variabilidade da estimação da evapotranspiração, afirmando que este é um dos fatores mais críticos para o gerenciamento da irrigação.

Considerando as dificuldades para determinar via solo a quantidade de água disponível à cultura e sua capacidade de utilizá-la, as variabilidades de fatores climáticos e o, em geral,

dispendioso trabalho de inferi-los, surgem como alternativa métodos mais diretos de medidas para determinar com maior exatidão o consumo de água por uma cultura, principalmente em plantas lenhosas.

A maioria destes métodos envolve medidas físicas que permitem estimar diretamente a transpiração por planta, como na utilização de câmaras gasosas ou pelo uso de traçadores radioativos. Nos denominados métodos térmicos, mede-se diretamente o fluxo de seiva que passa por um determinado segmento do tronco, utilizando princípios físicos relativamente simples. Eles podem ser aplicados diretamente no campo sem alterar as condições fisiológicas e microclimáticas da planta durante a medida (GREEN et al., 1997; SAKURATANI, 1981).

Entretanto, existem significativas restrições principalmente práticas ao seu emprego, haja vista a dificuldade de implantação em grandes áreas, à variabilidade das condições das próprias plantas, o alto custo dos sistemas e o alto nível de qualificação exigida ao operador dos mesmos (PEREIRA et al., 2002).

2.1.3 Manejo da irrigação baseado nas condições atmosféricas

O conhecimento dos fatores climáticos é de relevada importância para o manejo racional da irrigação. Em sua essência, estes fatores visam estimar a evapotranspiração máxima de cultura (ET_c) e, por consequência, a demanda hídrica exigida em função da cultura e seu estágio fenológico.

A determinação desta demanda permite que, monitorando a entrada e a saída de água do sistema e conhecendo a capacidade de água disponível do solo, obtenha-se o momento e a quantidade de água a ser fornecida ao sistema produtivo.

Thornthwaite e Mather (1955), desenvolveram o método do balanço hídrico, resultante da aplicação do princípio de conservação de massa, para se determinar a variação do armazenamento de água no solo, sem irrigação. A contabilização de variáveis atmosféricas e do solo permite descrever a quantidade de água que entra e sai do solo, e conseqüentemente, a quantidade de água disponível à cultura. Grande vantagem do método é não depender de medidas diretas das condições do solo.

O balanço hídrico é um dos métodos mais utilizados para estimar a demanda hídrica para os diferentes estágios de desenvolvimento das culturas. Para Pereira et al. (2002), o balanço

hídrico indica a contabilização da água do solo, representando o balanço entre a entrada e a saída de água no sistema. Valores de balanço hídrico altos indicam excedentes hídricos e os baixos, deficiência hídrica. Quando a precipitação for superior à quantidade necessária para atender à evapotranspiração potencial e completar o armazenamento de água no solo, verifica-se um excedente de água. A deficiência, por sua vez, ocorre quando o solo não conseguir suplementar a demanda atmosférica. Assim, o balanço hídrico contabiliza a precipitação e a evapotranspiração potencial, levando em consideração a capacidade de armazenamento de água no solo.

O balanço hídrico permite a utilização conjugada de variáveis de solo, de cultura e de clima a fim de melhor identificar o momento no qual irrigar e a quantidade de água a ser aplicada. Pode-se utilizar determinações da umidade do solo para corrigir os valores de armazenamento preditos pelo balanço hídrico, minimizando erros cumulativos.

2.2 Umidade do solo

A água é uma substância abundante no planeta Terra. Mesmo sendo um composto simples, possui importância fundamental na definição do aspecto físico e biológico do planeta, constituindo um meio indispensável para as reações químicas, físicas e biológicas que ocorrem no solo (VILLANI E WRIGHT, 1990).

O solo é um meio poroso granulado composto basicamente de rochas intemperizadas, ar, matéria orgânica e água. A fração sólida, ou matriz do solo, apresenta variações bastante lentas no tempo, ao passo que as quantidades de ar e água que preenchem os interstícios dos poros variam com facilidade e rapidez. A parte líquida do solo constitui-se essencialmente de água, contendo materiais dissolvidos e orgânicos solúveis (REICHARDT, 1987).

A estrutura química da água como molécula polar lhe permite agir como solvente universal e aderir às superfícies e em outras moléculas de água. Dessa característica se dão as forças de coesão e adesão, as quais irão originar, na interface sólido-líquido-gás, o fenômeno da capilaridade, responsável pelo poder de penetração de água em meio poroso e a sua retenção nos poros (CICHOTA, 2003). Ela é retida pelas superfícies dos sólidos por interações elétricas com grande força, mas restrita às proximidades das superfícies. Sendo a capilaridade inversamente

proporcional ao diâmetro dos poros, a água pode estar fortemente retida em microporos e livre nos macroporos (REICHARDT, 1987).

Portanto, os poros de vários tamanhos e diâmetros que compõem o solo exercem diferentes funções na matriz do solo, proporcionando aeração, a condução de água durante a infiltração, a redistribuição e o armazenamento de água na matriz (LIBARDI, 2000).

O conteúdo de água de um solo é um de seus atributos mais importantes, e um dos mais variáveis. O deslocamento e reciclagem de vários elementos químicos, o desenvolvimento dos processos bioquímicos do solo, o crescimento das plantas e uma série de outras propriedades físicas do próprio solo como densidade, resistência à penetração e tensão de cisalhamento, são significativamente influenciadas pelo teor de água. Sua quantificação é, portanto, de grande relevância para várias atividades (CICHOTA, 2003).

A umidade do solo pode ser expressa em base de massa (U , kg kg^{-1}) ou em base de volume (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), sendo esta mais usual (GARDNER, 1986).

$$U = \frac{m_a}{m_s} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{V_a}{V_s} \quad (3)$$

em que:

m_a : massa de água no solo; kg

m_s : massa de solo seco; kg

V_a : volume de água no solo; m^3

V_s : volume total do solo; m^3

Conhecendo-se as massas específicas do solo (ρ_s , kg m^{-3}) e da água (ρ_a , kg m^{-3}), as duas formas de expressar a umidade podem ser relacionadas conforme a eq. (4):

$$\theta = U \cdot \frac{\rho_s}{\rho_a} \quad (4)$$

2.3 Métodos para determinação de umidade do solo

Os métodos para determinação do conteúdo de água no solo são divididos em métodos diretos e indiretos. Os diretos ou gravimétricos baseiam-se na pesagem de amostras de solo úmido e depois da secagem, realizada em estufa a 105 °C (GARDNER, 1986). A diferença entre as duas medidas representa a massa de água presente naquela amostra.

Com a quantificação destas massas determina-se a umidade gravimétrica (U) do solo e caso a massa específica ou o volume da amostra também for conhecido, pode-se obter a umidade volumétrica (θ) pela equação (4).

Conhecido como método gravimétrico ou padrão de estufa, é considerado o método de referência. Suas principais desvantagens referem-se à execução trabalhosa e ao longo tempo entre a coleta da amostra e a obtenção do resultado, além de ser não automatizável e destrutivo.

Os métodos indiretos utilizam uma propriedade física do solo que é dependente da quantidade de água presente nele (GARDNER, 1986). Há vários processos e equipamentos que permitem a determinação indireta do teor de água do solo, como por exemplo os métodos elétricos (resistência ou a capacitância do solo), os térmicos (condutividade térmica), os radioativos (atenuação de nêutrons rápidos ou de raios gama), a tensiometria (potencial matricial) e a reflectometria no domínio do tempo (constante dielétrica relativa), entre outros (CICHOTA, 2003).

A principal vantagem dos métodos indiretos e não destrutivos é a repetibilidade da leitura num mesmo ponto, pois após serem instalados permanecem utilizáveis por certo tempo, sem a necessidade de revolver o solo. Muitas vezes também podem ser automatizados. A principal desvantagem desses métodos, entretanto, é que em geral as propriedades utilizadas não são unicamente dependentes do conteúdo de água do solo, podendo alterar a relação entre a resposta do método e a umidade do solo.

2.4 Método do carbureto de cálcio

Elevando-se rochas calcárias a temperatura de 900 °C, se obtém como produto o óxido de cálcio, também conhecido como cal ou cal virgem. O óxido de cálcio, aquecido juntamente com carbono em fornos a arco elétrico a temperaturas de 2000 °C, resulta na formação de carbeto de cálcio, mais conhecido como carbureto de cálcio (Figura 1), e monóxido de carbono, de acordo com a equação (5).

Em contato com a água, o carbureto de cálcio resulta na formação do gás acetileno, conforme já apresentado na equação (1).

O carbureto de cálcio, bem como seu processo de obtenção foi descoberto em 1892 pelo químico canadense T.L. Wilson. De forma acidental, enquanto pesquisava a obtenção de ligas metálicas a partir de misturas de cal aquecidas em forno de arco elétrico, deixou molhar uma substância esbranquiçada originada como subproduto de um de seus testes. O gás originado foi descrito como acetileno (MOREHEAD e CHALMOT, 1896; ENLOE et al., 2000).

Figura 1 – Carbureto de cálcio

Friedrich Wöhler, em 1862 já havia documentado a formação de um gás inflamável quando colocava em contato certos tipos de rochas calcárias com água. Posteriormente, identificou-se o material como o carbureto de cálcio e o gás como o acetileno, creditando-se a ele, portanto, a descoberta dessa reação (ENLOE et al., 2000).

O acetileno, cuja nomenclatura oficial pela União Internacional de Química Pura e Aplicada é etino, trata-se de um hidrocarboneto da classe dos alcinos, contendo dois carbonos ligados por tripla ligação química e dois hidrogênios.

A primeira aplicação do acetileno ocorreu devido à chama que o mesmo produzia. T.L.Wilson em 1895 relatava suas experiências no jornal “The New York Times”, dando ênfase à maior intensidade luminosa obtida pela chama do acetileno quando comparadas com chamas convencionais (WEST, 1916).

Em 1896 T.L.Wilson criou a lanterna de carbureto, que consistia num aparelho com duas câmaras, uma superior contendo água e outra inferior contendo carbureto de cálcio. Uma válvula controlava a vazão da água para a câmara contendo carbureto e, conseqüentemente, a quantidade de gás formado. Um orifício localizado ao lado das câmaras permitia a saída do gás e sua queima, originando assim a chama (CLEMMER, 1987). Na Figura 2 é apresentada a lanterna e seu diagrama.

Figura 2 – Lanterna de carbureto (a) e diagrama (b)

Apesar de Thomas Alva Edison ter inventado a lâmpada em 1879, a ainda recente expansão da eletricidade oferecia grande resistência à sua utilização. Esse fato favoreceu o uso da lanterna de carbureto, a qual foi empregada para iluminação de prédios e vias públicas, assim como farol para carruagens e bicicletas (ENLOE et. al, 2000).

O acetileno passou a ter grande utilização na indústria siderúrgica e seu processo de obtenção ganhou significativo enfoque. Morehead e Chalmot (1896) apresentaram um processo

de obtenção do carbureto de cálcio e do acetileno, baseado no mesmo princípio acidentalmente observado por Wilson em 1892.

Inicialmente, o estudo da reação do carbureto de cálcio com a água era realizado com o intuito de se obter a quantidade de carbureto necessária para produção suficiente do gás acetileno a ser utilizado no abastecimento da indústria (WEST, 1916).

A próxima aplicação do método tratava-se da extração da água de misturas líquidas contendo substâncias voláteis, como oxalato de amônio, ou compostos orgânicos, como alcoóis ou éteres (MASSON, 1911).

O primeiro trabalho a utilizar do método para determinar a quantidade de água de uma mistura foi apresentado por Roberts e Fraser (1910). Eles acrescentaram uma quantidade conhecida e abundante de carbureto em amostras de massa conhecida de petróleo. Pesando as amostras após a reação com o carbureto, a diferença de massa observada era proporcional a quantidade de água contida nas amostras. Masson (1911) descreveu e apresentou o mesmo método para fins de determinação de umidade.

West (1916) desenvolveu um aparelho baseado no método do carbureto para determinação do teor de água de xaropes, mas que poderia ser utilizado para demais líquidos.

Parks (1941) desenvolveu uma técnica que utilizava o método para determinação de umidade em grãos e silagem. Consistia em misturar o material com o carbureto e observar a redução na massa da mistura. A redução é proporcional a quantidade de água contida na amostra. Seus resultados foram satisfatórios quando os teores de umidade na amostra variavam entre 10 e 85%.

A partir dos resultados obtidos por Parks (1941), a empresa inglesa Thomas Ashworth Co., localizada em Burnley, desenvolveu o aparelho “The Speedy Moisture Tester”. A principal diferença em relação à técnica de Parks trata-se da medição da pressão ocasionada pela formação do gás acetileno no interior de uma câmara na qual o carbureto é misturado com a amostra.

2.5 Método do carbureto de cálcio: demonstração

Conforme mencionado anteriormente, o princípio de funcionamento do medidor de umidade Speedy baseia-se no método químico do carbureto de cálcio, onde a reação deste com a água causa a formação do gás acetileno proporcionalmente à quantidade de água disponível. A quantificação do acetileno permite determinar esse teor de água e, em consequência, a umidade do material que constitui a amostra em análise.

Sendo um gás a temperatura ambiente, o acetileno promove uma elevação na pressão do interior do Speedy, que é quantificada pelo manômetro tipo *bourdoun* localizado na tampa de seu cilindro.

Utilizando-se dos conceitos de umidade do solo e admitindo a massa específica da água como 1,0, pode-se expressar o volume de água contido numa determinada massa de solo, por:

100g de solo seco + Umidade (%) → 100g de solo seco

x g de solo úmido (M_u) → y g de solo seco (M_s)

$$M_s = \frac{M_u \cdot 100}{100 + U} \quad (6)$$

em que:

M_s : massa de solo seco; g

M_u : massa de solo úmido; g

U : umidade da amostra; %

A massa de água (M_a) é dada pela eq. (7), sendo V_a o volume de água.

$$M_a = V_a = M_u - M_s \quad (7)$$

(6) em (7):

$$V_a = M_u - \frac{M_u \cdot 100}{100 + U} \quad (8)$$

Tendo-se que, pela Lei de Avogadro, o volume molar de um gás ideal sob condição normal de temperatura e pressão (CNTP), corresponde a 22,4141 litros, torna-se possível para um volume qualquer de água, obter o volume do gás acetileno que será formado.

$$2 \cdot 18\text{g} \quad \rightarrow \quad 22,41411$$

$$V_a \quad \rightarrow \quad V_{\text{gás}}$$

$$V_{\text{gás}} = \frac{22,4141}{36} \cdot V_a \quad (10)$$

Assim, (8) em (10):

$$V_{\text{gás}} = 0,6226 \cdot \left(\text{Mu} - \frac{\text{Mu} \cdot 100}{100 + U} \right) \quad (11)$$

Aplicando-se a Lei de Boyle, cujo enunciado afirma que mantendo-se constante a temperatura, a pressão de um gás é inversamente proporcional ao volume ocupado pelo mesmo, pode-se encontrar a pressão que será exercida no interior do cilindro do Speedy pela formação do acetileno.

$$P_{\text{atm}} \cdot V_{\text{gás}} = P_s \cdot V_{\text{gás}}' \quad (12)$$

em que:

P_{atm} : pressão atmosférica; kgf cm^{-2}

$V_{\text{gás}}$: volume ocupado pela formação do acetileno a partir da reação da água com o carbureto de cálcio; L

P_s : pressão no interior do recipiente do Speedy; kgf cm^{-2}

$V_{\text{gás}}'$: volume final do gás; L

Deve-se considerar, ainda, que na eq. (12), o volume final ocupado pelo gás corresponde ao volume do Speedy subtraído pelo volume do ar (V_{ar}) e pelo volume da amostra de solo (V_{solo}).

$$V_{\text{gás}}' = V_s - V_{\text{ar}} - V_{\text{solo}} \quad (13)$$

$$V_{\text{ar}} = \frac{P_{\text{atm}} \cdot V_s}{P_s} \quad (14)$$

$$V_{\text{solo}} = \frac{M_s}{dp} = \frac{\text{Mu} \cdot 100}{(100 + U) \cdot dp} \quad (15)$$

em que:

dp: densidade de partículas do solo; g L⁻¹

Dessa forma, tem-se que, (14) e (15) em (13):

$$V_{gás'} = V_s - \frac{P_{atm} \cdot V_s}{P_s} - \frac{Mu \cdot 100}{(100 + U) \cdot dp} \quad (16)$$

(11) e (16) em (12):

$$P_{atm} \cdot 0,6226 \cdot \left(Mu - \frac{Mu \cdot 100}{100 + U} \right) = P_s \left(V_s - \frac{P_{atm} \cdot V_s}{P_s} - \frac{Mu \cdot 100}{(100 + U) \cdot dp} \right) \quad (17)$$

Isolando-se o valor de umidade (U) e sabendo-se que a pressão no Speedy equivale à soma da pressão indicada no manômetro com a pressão atmosférica, encontra-se a expressão matemática responsável por converter os valores de pressão, visualizados no manômetro do Speedy, a valores de porcentagem de água contida na amostra.

$$U = \left[\frac{\left(1 - \frac{P_m + P_{atm}}{dp \cdot P_{atm} \cdot 0,6226} \right) \cdot 100Mu}{\frac{V_s}{0,6226} - \frac{(P_m + P_{atm}) \cdot V_s}{P_{atm} \cdot 0,6226} + Mu} \right] - 100 \quad (18)$$

em que:

U: umidade da amostra de solo; %

P_m: pressão lida no manômetro; kgf cm⁻²

P_{atm}: pressão atmosférica local; kgf cm⁻²

dp: densidade de partículas do solo; g L⁻¹

U_m: massa de solo úmido; g

V_s: volume do recipiente do Speedy; (L)

A eq. (18) expressa, matematicamente, as relações que se desenvolvem no interior do Speedy.

É importante destacar que a quantidade de água contida no ar, segundo se apresentará a seguir, pode ser desprezada já que, mesmo admitindo-se valores extremos ($UR = 100 \%$), esta possui ordem de grandeza muito pequena quando comparada com os teores de água da amostra.

Sabe-se que, pela equação de Tetens:

$$e_s = 0,6108 \frac{7,5 \cdot T_{ar}}{237,3 + T_{ar}} \quad (19)$$

em que:

e_s : pressão de saturação de vapor de água; kPa

T_{ar} : temperatura do ar; °C

Assim como:

$$UR = \frac{e_a}{e_s} \cdot 100 \quad (20)$$

em que:

UR: umidade relativa do ar; % e

e_a : pressão parcial de vapor de água; kPa

Por Clapeyron, tem-se:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \text{ ou } P \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (21)$$

Desenvolvendo-a:

$$e_a \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (22)$$

$$e_a \cdot M = \frac{m}{V} \cdot R \cdot T \quad (23)$$

$$\frac{m}{V} = \frac{e_a}{T} \cdot \frac{M}{R} \quad (24)$$

Considerando-se a água, tem-se que:

$\frac{m}{V} = UA$ (g de $H_2O \cdot m^{-3}$ de ar) é a umidade absoluta ou massa específica.

$M = 18,015$ (g.mol⁻¹);

$R = 8,31 \cdot 10^{-3}$ (kPa.m³.mol⁻¹.K⁻¹).

Assim:

$$UA = \frac{e_a}{T} \cdot \frac{18,015}{8,31 \cdot 10^{-3}} \quad (25)$$

$$UA = \frac{2168 \cdot e_a}{T} \quad (26)$$

Tomando-se, como exemplo, uma condição extrema de umidade relativa do ar de 100%, com uma temperatura de 20 °C, obtém-se:

$$UR = 100\%; \quad T_{ar} = 20 \text{ °C ou } 293 \text{ K};$$

$$\text{por (19):} \quad e_s = 0,6108^{\frac{7,5 \cdot 20}{237,3 + 20}} \rightarrow e_s = 2,3382 \text{ kPa};$$

$$\text{por (20):} \quad 100 = \frac{e_a}{2,3382} \cdot 100 \rightarrow e_a = 2,3382 \text{ kPa};$$

$$\text{por (26):} \quad UA = \frac{2168 \cdot 2,3382}{293} \rightarrow UA = 17,3011 \text{ g de H}_2\text{O/m}^3 \text{ de ar.}$$

Como o volume do cilindro do Speedy é de 0,6285 litros, chega-se a:

$$\text{Massa de água no ar} = 0,6285 \text{ l} \cdot 17,3011 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} = 0,0109 \text{ g}$$

Considerando-se a massa específica da água como 1000 kg.m⁻³ ou 1g.ml⁻¹, tem-se que o volume de água contido no ar presente no Speedy é de 10,9·10⁻⁶ litros, equivalendo a aproximadamente 2 % da quantidade de água contida na menor amostra possível de se utilizar no Speedy e, apresentando esta ainda, a menor umidade quantificável pela antiga tabela do aparelho.

Justifica-se, portanto, a exclusão de variáveis referentes à quantidade de água do ar presente no cilindro do Speedy, da expressão matemática obtida.

2.6 O aparelho Speedy

Paiva et al. (1951) preconizaram o uso do aparelho inglês denominado “The Speedy moisture tester” para determinações rápidas do teor de umidade em amostras de solo, no próprio campo. Baseado na reação da água com o carbureto de cálcio, o aparelho até então era empregado em determinações rápidas de umidade de materiais diversos, como sementes, fibras e carvão, entre outros.

Os mesmos autores relataram ao fabricante do aparelho a obtenção de novos resultados, bastante satisfatórios, na determinação do teor de umidade em vários tipos de solos. Informavam que os resultados obtidos se assemelhavam bastante com os obtidos com o método padrão de estufa a 105°C, apesar de terem sido determinados no campo, em apenas cinco minutos.

Camargo e Costa (1960) compararam determinações de umidade em 220 amostras de solo, do grupo arenito Bauru, feitas concomitantemente pelo método da reação com o carbureto de cálcio, no aparelho “Speedy moisture tester”, e pelo método padrão de estufa. Os resultados foram bastante satisfatórios, apresentando coeficiente de correlação de 0,97 entre as determinações realizadas pelos dois métodos. O método do carbureto apresentou resultados de teores de umidade um pouco mais baixos que os da estufa, havendo em média uma diferença de 0,6 para menos. O aparelho mostrou-se preciso, apesar de seus resultados serem obtidos em poucos minutos no próprio campo, sem necessidade de instalações especiais, levando os autores a recomendarem seu uso nos trabalhos que exigem numerosas e rápidas determinações da umidade do solo.

Piedade e Klar (1972) compararam o método do carbureto de cálcio e o método das pesagens com o método da estufa, usando três tipos de solos, de texturas argilosa, mediana e arenosa, representados respectivamente por 26, 28 e 28 amostras, cada uma com três repetições. Entre os métodos da estufa e do carbureto, foram constatados coeficientes de correlação de 0,99 tanto para as amostras de solo de textura argilosa e mediana, quanto para a arenosa. Já entre os métodos da estufa e das pesagens, foram observados coeficientes de correlação de 0,98, 0,91 e 0,99, respectivamente para as amostras de solo de textura argilosa, mediana e arenosa.

Oliveira (1976) comparou determinações dos teores de umidade de um solo de textura argilosa pelos métodos padrão de estufa, Speedy, pesagens, *bouyoucos* e tensiométrico. Utilizou-

se de uma área de 30m^2 , subdivididas e áreas de 1m^2 , nas quais foram instalados três tensiômetros e três células *bouyoucos* a 0,20m de profundidade. Por meio de um trado holandês, foram retiradas amostras a profundidade de 0,20m, para determinações pelos métodos padrão de estufa, Speedy e pesagens. Analisando-se os dados, foram obtidos coeficientes de correlação de 0,84 para o método do Speedy, 0,88 para o método das pesagens, 0,85 para o método *bouyoucos* e 0,87 para o método tensiométrico, quando comparados com o método padrão de estufa. Dentre os métodos estudados, o que obteve menor coeficiente de correlação foi o do Speedy, segundo o autor, devido à textura argilosa do solo em questão.

2.7 Eletrônica na agricultura

O desenvolvimento de um país está diretamente atrelado aos níveis de produtividade de suas principais atividades. Países desenvolvidos possuem maior capacidade de produção por habitante quando comparados a países em desenvolvimento, justamente pela maior tecnologia empregada nos processos produtivos, seja por meio dos métodos, equipamentos ou profissionais. (FREIRE, 2000).

Grande parte das inovações tecnológicas tem como princípio básico os dispositivos eletrônicos, os quais cada vez mais ganham posição de destaque entre as outras tecnologias (BRAGA, 1999).

A automação de processos tem sido uma tecnologia de profunda repercussão, cuja importância consiste não somente em substituir o trabalho humano nas tarefas cansativas ou monótonas, mas principalmente em permitir significativa melhoria na qualidade dos processos e na capacidade produtiva (CASTRUCCI, 1969)

A rápida evolução da eletrônica, associada à expansão do mercado, tem possibilitado o acesso à tecnologia e ferramentas que antes eram disponíveis apenas em grandes laboratórios e centro de pesquisas (GOMIDE, 1998). Os benefícios desse avanço tecnológico tem contemplado também a agricultura, seja pelo desenvolvimento de novos equipamentos ou pela adaptação dos já disponíveis em outros setores da produção (VILELA, 2002). A eletrônica é utilizada na

agricultura e zootecnia, principalmente para automatizar processos, monitorar os sistemas, otimizar a produção e reduzir perdas (SILVA, 2000).

Dentre os dispositivos eletrônicos, os microcontroladores possuem fundamental importância, sendo utilizados para os mais variados fins. Rocha et al. (2003), visando ajustar o modelo de Chistiansen-Hargreaves para a estimativa da evapotranspiração do feijão, utilizaram lisímetros instrumentados com células de cargas para aferição do volume de água consumida pela cultura.

Bianchini et al. (2002) utilizaram um microcontrolador no desenvolvimento de um penetrógrafo eletrônico automático. Sistema registra a informação geográfica por meio de um receptor de GNSS (Global Navigation Satellite System), armazena as leituras e permite comunicação com computadores para descarregamento das informações.

Queiroz (2004) desenvolveu um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central, utilizando-se de microcontroladores, sensores de pressão e transmissores de rádio frequência. O sistema obtinha leituras automáticas de tensiômetros, comunicava-se via rádio com a central e era capaz de atuar sobre o funcionamento de um pivô central.

Camargo (2009) também um microcontrolador para o desenvolvimento de um medidor eletrônico de vazão do tipo força, utilizando células de carga.

2.7.1 Microcontroladores

O microcontrolador é um dispositivo eletrônico composto por componentes interligados aptos a desempenhar diversas funções. Pode ser definido como um sistema computacional integrado, pois possui unidade de processamento, memória e entradas e saídas, integradas em um único chip. De acordo com um programa armazenado em sua memória, o microcontrolador utiliza de dados de entrada e/ou saída, executa com estes algum processamento e executa uma função de controle ou registro (QUEIROZ, 2007).

Os microcontroladores se diferenciam dos processadores, pois além dos componentes lógicos e aritméticos usuais de um microprocessador de uso geral, o microcontrolador integra elementos adicionais em sua estrutura interna, como memória de leitura e escrita para armazenamento de dados, memória somente de leitura para armazenamento de programas, memória para armazenamento permanente de dados, dispositivos periféricos como conversores

analógico-digitais, conversores digitais-analógicos e interfaces de entrada e saída de dados. A importância da integração está no tamanho reduzido, baixo custo e alto desempenho dos circuitos, aliado à confiabilidade e estabilidade de funcionamento. Devido ao encapsulamento dos componentes, obtém-se ainda maior resistência mecânica e peças cada vez mais robustas (CAMARGO, 2009).

2.7.2 Basic Step

De forma geral, um microcontrolador exige um compilador específico e caro para desenvolvimento e gravação do programa a ser executado. O Basic Step é um microcontrolador que apresenta facilidades em sua utilização em relação aos microcontroladores, justamente por possuir um compilador simples, que utiliza de linguagem Basic e que é fornecido gratuitamente pelo fabricante. A alimentação do dispositivo pode ser realizada com tensões entre 7,5 e 15 Vcc (volt em corrente contínua). Em função do modelo, o Basic Step possui um determinado número de portas configuráveis para entrada ou saída e conversores analógicos-digitais.

O compilador fornecido para uso com este componente possui 32 instruções, contemplando uma estrutura de “loop”, o “for next”, uma condicional, o “if then”. Possui função “debug” para procurar erros nos códigos programados e “download”, para envio do programa ao microprocessador via comunicação serial.

Uma vez transferido o programa, o mesmo permanece armazenado na memória “EEPROM” do microcontrolador, sendo executado toda vez que o dispositivo for ligado.

Vários trabalhos são encontrados envolvendo a utilização do Basic Step. Vilela (2002) desenvolveu um sistema de aplicação de defensivos acoplado a um pivô central, utilizando-se do Basic Step para controle da operação. Vilela et al. (2003) desenvolveram um manômetro digital microprocessado utilizando o Basic Step. Ibars (2004) desenvolveu tubos Venturi para medição da vazão, também utilizando do microcontrolador para automação da aquisição de dados do aparelho desenvolvido. Garzella et al. (2007) utilizaram o microcontrolador associado a um sonar para automatizar a leitura de vazão de um vertedor.

2.7.3 Conversor analógico-digital (A/D)

Entende-se por analógica toda variação contínua de uma variável. Todas as grandezas físicas, como velocidade, pressão, temperatura, entre outras, variam de forma analógica, ou seja, para atingir um valor desejado é necessário que ela passe por todos os valores intermediários de forma contínua. Por digital, entende-se toda variação discreta, ou seja, a passagem de um valor a outro se dá por saltos. Assim sendo, comparando-se a variação analógica com a digital tem-se que na primeira entre um valor e outro existem infinitos valores, enquanto que na segunda existem um número finito de valores (IDOETA E CAPUANO, 2007).

Para que um sinal analógico possa ser lido por um computador ele precisa ser convertido para digital. Em telefonia, por exemplo, quando se fala ao telefone, a voz, expressa em grandeza analógica, é captada por um microfone e convertida em um sinal digital, o qual é enviado à central telefônica. O sinal digital é recebido pelo aparelho telefônico, convertido novamente em analógico e emitido por um alto-falante, permitindo que se ouça a voz.

O funcionamento do conversor A/D é baseado em circuitos comparadores, cuja resposta em função do sinal de entrada é expressa em valores binários, ou seja, 0 ou 1. Quando o sinal de entrada é menor que o sinal no comparador, o mesmo resulta em valor 0. Quando o sinal na entrada assume valor maior que o no comparador, resulta-se em valor 1. Para esta condição, o sinal passa a ser comparado ao segundo comparador, até que o mesmo retorne 1. Assim sucessivamente (IDOETA E CAPUANO, 2007).

O número de comparadores de um conversor define sua resolução. Quanto maior esse número, maior a quantidade de bits do conversor, maior a possibilidade de combinações entre valores 0 e 1 e mais o sinal analógico se aproximará do digital.

Por exemplo, para um conversor A/D de 8 bits, podendo cada bit assumir valor 0 ou 1, tem-se 256 combinações possíveis. Ou seja, no caso de se entrar com um valor analógico variando entre 0 e 5 Vcc, um A/D de 8 bits será capaz de identificar variação a cada 19 mV (mili volts). No caso da utilização de um A/D de 10 bits, haveria 1024 combinações possíveis e seria identificada variação a cada 5 mV.

2.8 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade tem por objetivo avaliar o comportamento dos modelos físicos e matemáticos quando os dados de entrada podem estar incertos ou errôneos. Tem aplicação em diversas áreas do conhecimento especialmente para se avaliar o risco, propondo uma série de cenários às variáveis de entrada para se obter uma percepção da implicação em termos de variabilidade dos resultados (GITMAN, 1997).

A análise de sensibilidade pode ser expressa na forma de mudanças relativas, gráficos, tabelas e funções, e permite que o usuário identifique quais variáveis devem ser medidas com maior exatidão (EVANGELISTA e FERREIRA, 2006).

McCuen e Snyder (1986) apud Chaves (2009) recomendam a utilização da sensibilidade relativa (S_r), razão entre a taxa de variação da resposta do modelo (ΔS) a uma pequena variação de entrada (ΔE), conforme a eq. (26).

$$S_r = \frac{(\Delta S / S_i)}{(\Delta E / E_i)} \quad (26)$$

em que:

S_r : sensibilidade relativa;

ΔS : taxa de variação da resposta do modelo;

S_i : valor inicial de saída;

ΔE : taxa de variação da entrada dos dados;

E_i : valor inicial de entrada.

Valores de sensibilidade relativa menores que 0,5 são considerados baixos, entre 0,5 e 1,5 são intermediários e acima de 1,5 são altos. Valores negativos indicam que o modelo é correlacionado negativamente com o parâmetro.

2.9 Análise de correlação e análise de erro

Quando, ao estudar duas variáveis, verificar-se que aos valores baixos de uma correspondem os valores baixos de outra, o mesmo ocorrendo com os valores elevados e os intermediários, supõe-se que existe entre elas uma relação. Se os valores dessas variáveis, plotados sobre um sistema de eixos perpendiculares, dispõem-se nas proximidades de uma reta, diz-se haver entre as variáveis uma correlação linear (ANDRIOTTI, 2003).

Um modelo de correlação linear pode ser descrito pela eq. (27).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (27)$$

em que:

Y: variável dependente (observada);

X: variável independente (estimada);

β_0 e β_1 : parâmetros;

ε : erro aleatório;

Todo processo de medição, mesmo que se realize todas as correções e calibrações possíveis, contém erros. Em experimentos, é comum a ocorrência de erros dos tipos aleatórios e sistemáticos.

Os erros aleatórios são causados por influências pequenas e independentes, as quais impedem que o sistema de medição apresente um mesmo resultado quando um valor de entrada é constante. A avaliação desse tipo de erro é realizada de forma indireta, por meio de uma análise do grau de precisão do experimento.

Uma forma de se indicar a precisão é por meio do índice de correlação de Pearson, apresentado na eq. (28).

$$r = \frac{N \left(\sum_{i=1}^N E_i O_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N E_i \right) \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)}{\sqrt{\left[\left(N \sum_{i=1}^N (E_i)^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N E_i \right)^2 \right] \left[\left(N \sum_{i=1}^N (O_i)^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)^2 \right]}} \quad (28)$$

em que:

r: índice de correlação de Pearson;

N: número de repetições;

E_i : i-ésima variável estimada;

O_i : i-ésima variável observada.

O coeficiente de correlação linear (r), ou índice de correlação de Pearson em homenagem a quem o definiu, é uma medida da intensidade da relação entre os dados emparelhados das duas variáveis, podendo variar entre -1, quando a correlação é totalmente inversa, e 1, quando totalmente direta. O valor zero representa ausência de correlação linear. Deve-se ter cuidado na interpretação deste índice, pois o mesmo não implica a existência de causa e efeito entre as variáveis, uma vez que a relação observada pode ser puramente casual ou influência de uma terceira variável.

A relação pode ser corroborada pelo coeficiente de determinação (r^2), que representa a parte da variância total das duas variáveis que pode ser explicada pela sua relação linear, conforme eq. (29).

$$r^2 = (\text{variação total} - \text{variação não explicada}) / \text{variação total} \quad (29)$$

Assim, o coeficiente de determinação é a proporção da variação total na variável observada explicada pela variação na variável estimada.

Os erros que permanecem constantes durante um ensaio são denominados de sistemáticos, podendo ser determinados por comparação dos valores das medições com valores de referência. Esse tipo de erro está associado com a exatidão ou acurácia do sistema, caracterizando o quanto o

dado estimado está distante do observado. Quanto menor a diferença entre os valores estimados e observados maior é a exatidão e, portanto, menor o erro sistemático.

Willmott (1981) propôs a eq. (30) para determinar a exatidão de um dado estimado, estabelecendo seu resultado como índice de concordância de Willmott.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left(|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}| \right)^2} \quad (30)$$

em que:

d: índice de concordância de Willmott.

2.10 Material e Métodos

2.10.1 Localização e etapas do trabalho

Este trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), localizada em Piracicaba, SP, cujas coordenadas geográficas são: 20° 42’ 30’’ de latitude sul e 47° 38’ 00’’ longitude oeste, a 580 m de altitude.

A primeira etapa desta pesquisa constituiu-se de uma revisão das teorias químicas que permitissem demonstrar o método no qual se baseia o aparelho Speedy. Após o referente estudo, desenvolveu-se a equação química que fundamenta o funcionamento do instrumento.

Realizou-se também, um estudo mais específico sobre a importância e a utilização do balanço hídrico para fins de manejo da irrigação, permitindo traçar necessidades a serem supridas pelo sistema em desenvolvimento.

Visando a criação dos programas de controle do sistema, a assumiu-se como próxima etapa desta pesquisa, um longo período de estudo sobre linguagens de programação a serem adotadas, bem como suas interfaces com as portas de comunicação serial e paralela dos computadores. Nesta etapa adquiriu-se conhecimentos essenciais à elaboração dos programas.

O próximo passo consistiu em testes de controle de dispositivos eletrônicos a serem manipulados pelo projeto, utilizando-se das linguagens de programação adotadas. Através desses testes, tornou-se possível desenvolver a interface entre os programas, o medidor de umidade, os sensores e as unidades de armazenamento.

Na etapa terminal do trabalho, ajustou-se as características dos programas visando otimizar o funcionamento dos sistemas, facilitando a execução de testes e melhorando a aparência aos usuários. Com o dispositivo funcionando adequadamente, tornou-se possível a avaliação do medidor comparando-o com o método gravimétrico.

2.10.2 Sistemas e estruturação

A fim de permitir um grau de integração satisfatório ao usuário, desenvolveu-se quatro

sistemas. Apesar de diferentes, todos possuem a mesma equação para conversão dos valores de pressão obtidos pelo sensor para valores de umidade do solo. Cada sistema possui sua particularidade após a determinação do valor de umidade.

O primeiro sistema consistiu na simples leitura da pressão no interior do Speedy por meio de um sensor, e a apresentação direta do valor de umidade da amostra de solo. Um dispositivo microcontrolado obtém a leitura do sensor de pressão, processa em umidade e apresenta o valor em um display.

O segundo sistema consistiu na leitura do sensor de pressão diretamente por um computador pessoal rodando um aplicativo em ambiente MS-DOS. Um programa desenvolvido em linguagem basic, utilizando de comunicação paralela, obtém a leitura do sensor de pressão, converte em umidade e apresenta o valor na tela do computador.

O terceiro sistema também utilizou um computador. Um programa desenvolvido em linguagem Pascal, por meio de comunicação paralela ou serial, obtém a leitura de pressão do sensor, processa em umidade e apresenta uma avaliação sobre a eventual necessidade de irrigação e a quantidade de água a ser aplicada. Este programa permite gravação dos dados, e utiliza variáveis da cultura e do solo.

Por fim, o quarto sistema constitui-se num programa de balanço hídrico para manejo da irrigação. Construído em linguagem basic e pascal, é formado pela parte de software e hardware, sendo que ambas podem funcionar de maneira independente. Neste caso, um dispositivo permanece junto ao Speedy apresentando as leituras de umidade num display e registrando-as numa memória flash (*pen drive*). No programa de computador, o usuário pode optar por corrigir automaticamente a quantidade de água disponível à cultura com as leituras registradas pelo dispositivo junto ao Speedy.

2.10.3 Descrição dos equipamentos e componentes

Para o desenvolvimento da pesquisa, fez-se uso além de um computador pessoal com o Sistema Operacional Windows instalado, de um medidor de umidade tipo Speedy e de um dispositivo eletrônico que permitisse a interface entre o Speedy e o computador.

Para a construção do dispositivo de interface, utilizou-se uma série de componentes os quais são apresentados a seguir.

2.10.3.1 Medidor de umidade Speedy

É constituído por um cilindro metálico de 0,6285 litros de capacidade (Figura 3), no qual através de sua tampa fixa-se um manômetro tipo bourdoun, cuja faixa de trabalho varia entre 0 e 2 kgf cm⁻². Permite utilização de amostras de solo de 5, 10 ou 20 gramas, em função da umidade esperada. O modelo utilizado é fabricado pela *Solotest Aparelhos para Mecânica do Solo Ltda.*

Figura 3 - Medidor de umidade Speedy

2.10.3.2 Conversor analógico-digital (A/D)

Fabricado pela *National Semiconductor*, o conversor A/D modelo ADC0832 apresenta resolução de 8 bits, 2 canais, alimentação de 5 volts, potência média de 15 mW e tempo de conversão de 32 μ s (Figura 4).

Figura 4 - Conversor analógico-digital ADC 0832

2.10.3.3 Sensor de Pressão

Com uma faixa de trabalho de 0 a 7 kgf.cm⁻², o sensor (Figura 5) gera sinais de saída entre 0,2 e 4,7 Vcc, possuindo tensão de alimentação de 5 Vcc. Possui um erro máximo de 2,5% quando em temperatura de 0 a 85 °C. É fabricado pela *Motorola*, sendo o modelo MPX5700 DP.

Figura 5 - Sensor de pressão

2.10.3.4 Microcontrolador Basic Step I

Incorporando numa só placa tanto um microcontrolador PIC16F628, uma memória com o interpretador da linguagem *Basic* e um regulador de tensão, este componente (Figura 6) de 8 bits pode ser alimentado com tensão de 7,5 a 15 Vcc. Possui 14 terminais dos quais 8 são portas configuráveis para entrada ou saída. É programável pela porta serial de um computador e possui uma capacidade total de corrente de 2 a 50 mA. É fabricado pela *Tato Equipamentos Eletrônicos*.

Figura 6 – Basic Step I

2.10.3.5 Microcontrolador Basic Step M8

Este dispositivo é semelhante ao Basic Step I, porém já possui incorporado 8 canais de conversor A/D de 10 bits, sendo que um deles foi utilizado no sistema. O M8 (Figura 7) também é de 8 bits, pode ser alimentado com tensão de 7,5 a 15 Vcc e possui 22 terminais configuráveis para entrada ou saída. Sua programação também é realizada utilizando-se da porta serial de um computador, para comunicação com o compilador. Seu fabricante é a *Tato Equipamentos*

Eletrônicos.

Figura 7 – Basic Step M8

2.10.3.6 Driver para memória flash (*pen drive*)

Utilizou-se de um driver de memória flash (Figura 8) para gravar as informações referentes à determinação de umidade via Speedy num *pen drive*. O dispositivo utilizado denomina-se PenBs e é fabricado pela *Tato Equipamentos Eletrônicos*. Permite comunicação serial nos protocolos UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) ou SPI (*Serial Peripheral Interface*), com velocidade de até 3 MBps.

Figura 8 – Driver para memória flash (*pen drive*)

2.10.4 Descrição das linguagens de programação utilizadas

Fez-se uso de duas linguagens de programação para a elaboração dos programas de controle do sistema. Ambas as linguagens são amplamente exploradas no ramo da programação para eletrônica, principalmente por proporcionarem uma ótima interface do computador com o seu exterior através das portas de comunicação, sejam elas paralelas ou seriais.

2.10.4.1 Linguagem Basic

Uma das mais antigas e simples linguagens de programação, permite a criação de programas em ambiente MS-DOS, fato que apesar de apresentar algumas limitações, torna apto a

utilização de computadores mais antigos e de menor custo. Utilizou-se do programa Quick Basic versão 4.5 para criação do código fonte.

2.10.4.2 Linguagem Pascal

Atualmente esta linguagem se faz presente em quase todo ramo da programação, dada a sua facilidade de utilização, disponibilidade de recursos e possibilidade de aplicação. Pode trabalhar em ambiente MS-Windows, permitindo a integração de inúmeros programas. Para criação do código fonte, utilizou-se dos compiladores Delphi e Visual Basic, ambos muito comuns em programação especialmente pelo padrão Windows, cujo fator visual atua como importante ferramenta para simplificação da atividade do programador.

Os programas elaborados nas duas linguagens, possuem basicamente a mesma função: realizar a comunicação, via porta paralela ou serial, do computador com o medidor de umidade. Devido a características próprias de cada uma dessas linguagens, observa-se que o programa criado em pascal apresenta uma maior disponibilidade de recursos e maior potencial de utilização, diante do panorama da informática atual.

2.10.5 Análise de sensibilidade da equação obtida

A equação demonstrada neste trabalho, que descreve o método químico do carbureto de cálcio e que foi utilizada na automação foi submetida à análise de sensibilidade. Cada uma das cinco variáveis de entrada da equação, a partir de um valor central, foram alteradas em -40%, -20%, -15%, -10%, -5%, 5%, 10%, 15%, 20% e 40%, mantendo-se as demais constantes.

Foram avaliados, portanto, cinquenta cenários diferentes, os quais foram expressos por meio de gráfico. Determinou-se a sensibilidade relativa de cada variável.

2.10.6 Metodologia para avaliação da medição de umidade via Speedy

Considerando-se a que a equação que descreve a umidade a partir da leitura do valor de pressão é a mesma para todos os sistemas, comparou-se os valores de umidade via Speedy com valores determinados pelo método gravimétrico.

Realizou-se dois ensaios, sendo o primeiro visando avaliar a equação desenvolvida e o segundo o sistema de automação da leitura do aparelho.

A metodologia desenvolvida foi capaz de proporcionar parâmetros de umidade nos quais se desejasse trabalhar com o medidor. Tinha-se, portanto, uma estimativa de quanto o aparelho deveria indicar em cada medição, permitindo escolha de faixas de umidade mais adequadas às condições de uso no campo.

O solo utilizado nestes ensaios possuía textura argilosa, com 39,4% de argila, 27,5% de silte e 66,9% de areia.

Para o desenvolvimento dos ensaios, coletou-se 4 kg de solo parcialmente seco, realizando-se a determinação da umidade pelo método padrão de estufa. A partir dessa umidade, realizou-se o cálculo da quantidade de água a ser adicionada à amostra para que esta apresentasse a umidade desejada. O próximo passo consistiu-se na adição da água assim como numa adequada homogeneização do solo, coletando-se em seguida seis amostras de 100 g, sendo três para determinação via método padrão de estufa e três para determinação via Speedy. Repetiu-se essas operações para todas as umidades desejadas.

Estabeleceu-se seis valores de umidades pretendidas, sendo estes de 4%, 8%, 12%, 16%, 20% e 24%. Com o solo em cada uma dessas faixas de umidade, realizou-se determinações da umidade pelo método padrão de estufa e pelo método do Speedy, ambos com três medidas repetidas.

Foi utilizada estufa ventilada e aquecida eletricamente à temperatura de 105°C, do Laboratório de Física de Solos, do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP. As determinações seguiram o procedimento normal, com pesagens em balança adequada antes e depois das secagens. As determinações pelo aparelho Speedy obedeceram as instruções fornecidas pelo fabricante.

No primeiro ensaio, foram realizadas determinações de umidade pelo Speedy em sua constituição original, ou seja, lendo-se o valor de pressão em seu manômetro e em seguida

convertendo-o em umidade com o uso de tabela que acompanha o aparelho. Neste ensaio, a leitura de pressão também foi convertida em umidade fazendo-se uso da equação desenvolvida.

Dessa forma, para cada amostra de solo em cada nível de umidade pretendida, obtinha-se um resultado pelo método da estufa e dois resultados a partir da leitura de pressão no manômetro do Speedy, sendo o primeiro utilizando-se da tabela e o segundo, da equação proposta.

No segundo ensaio, as determinações foram realizadas pelo método da estufa e pelo Speedy acoplado ao dispositivo de automação de sua leitura.

Os resultados de cada ensaio foram avaliados a partir de uma análise de regressão e do teste t, no qual a hipótese H_0 consistiu na não diferença entre as médias das determinações de umidade pelos métodos da estufa e do Speedy.

2.10.7 Metodologia para avaliação do dispositivo em campo

Visando avaliar o funcionamento em campo do medidor acoplado ao dispositivo desenvolvido, utilizou-se do terceiro sistema dentro de um experimento conduzido numa área de 0,45 ha, localizada na Fazenda Areão, pertencente à ESALQ/USP, Piracicaba – SP. O experimento fez parte de um projeto de mestrado, e por isso, possuía instalado na área um sistema de irrigação por gotejamento, o que permitiu o teste do aparelho em uma faixa mais abrangente de umidade. O solo da área é classificado como Terra Roxa Estruturada, possui suas características físicas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características físicas do solo da área experimental

Camada (cm)	θ_{cc} (cm³ cm⁻³)	θ_{pmp} (cm³ cm⁻³)	Densidade (g cm⁻³)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
0-20	0,4148	0,3472	1,49	62,40	17,20	20,40
20-40	0,4193	0,3491	1,46	69,43	13,83	16,74
40-60	0,4500	0,3808	1,43	68,89	13,63	17,48

Para se avaliar o Speedy, estabeleceu-se 15 pontos de amostragens (Figura 9) nos quais realizou-se a determinação de umidade pelo método padrão de estufa a 105°C e pelo Speedy acoplado ao dispositivo, utilizando-se de três repetições para cada um dos métodos.

Figura 9 – Área do experimento, com os pontos de amostragem

Cada amostra foi composta por 8 sub-amostras, coletadas num raio de 10 m a partir do ponto central. As sub-amostras foram homogeneizadas em um balde, do qual retirou-se três amostras para determinação de umidade pelo método da estufa e três pelo aparelho Speedy, constituindo-se, assim, três medidas repetidas para cada método.

A fim de se obter as três repetições, o procedimento de amostragem foi repetido mais duas vezes para cada ponto, sendo que as sub-amostras foram coletadas de modo aleatório.

As determinações pelo Speedy foram realizadas no próprio campo, enquanto que as amostras destinadas à determinação pelo método da estufa foram armazenadas em latinhas de metal, envolvidas em papel alumínio.

Assim como para os ensaios em laboratórios, os resultados foram submetidos à análise de regressão e do teste t. A hipótese H_0 consistiu na não diferença entre as médias das determinações de umidade pelos métodos da estufa e do Speedy.

2.11 Resultados e Discussão

2.11.1 Análise de sensibilidade da equação obtida

Com os cenários utilizados para a análise de sensibilidade, elaborou-se um gráfico que expressa a variação percentual em cada variável pela unidade originada como resultado, mantendo-se constantes as demais variáveis (Figura 10).

Figura 10 – Gráfico de análise de sensibilidade, que relaciona a variação percentual em cada variável e sua implicação no valor de umidade resultante

Verifica-se que o volume do cilindro do Speedy (Vs) e a pressão causada pela formação do gás (Pm) relacionam-se positivamente com a umidade determinada, enquanto que a massa de solo da amostra (Mu) e a pressão atmosférica (Patm) relacionam-se negativamente com a umidade. A densidade de partículas do solo (dp), praticamente não se relaciona com a umidade.

A relação positiva entre pressão no interior do aparelho e a umidade é facilmente explicada pelo método do carbureto de cálcio. Quanto maior a pressão observada, maior deve ser a umidade.

Mantendo-se constantes as demais variáveis, quanto maior o volume do cilindro do aparelho maior será a quantidade de água contida na amostra para que a pressão em seu interior continue a mesma, explicando a relação positiva.

Para uma mesma pressão observada e, portanto, para a mesma quantidade de água presente no aparelho, quanto maior a massa de solo (μ) menor o teor de água da amostra, explicando a relação negativa observada para essa variável.

A pressão observada no interior do aparelho (P_m) acompanha a pressão atmosférica local (P_{atm}). Quanto maior a P_{atm} , mantendo-se constante a P_m , mais elas se equivalem e menor é a quantidade de água que reagiu com o carbureto, explicando portanto a relação negativa.

Na Tabela 2 é apresentada a sensibilidade relativa obtida para cada variável.

Tabela 2 - Sensibilidade relativa calculada para as variáveis de entrada da equação obtida

P_m (kgf cm ⁻²)	P_{atm} (kgf cm-2)	μ (g)	dp (g L ⁻¹)	V_s (L)
1,285	-1,528	-1,535	0,010	1,290

Verifica-se que a pressão atmosférica (P_{atm}) e a massa de solo (μ) apresentaram sensibilidade relativa alta, a pressão no interior do aparelho (P_m) e o volume do cilindro do aparelho (V_s) apresentaram sensibilidade relativa intermediária e a densidade de partículas sensibilidade relativa baixa.

2.11.2 Avaliação da medição de umidade via Speedy

Para o primeiro ensaio realizado, os resultados das determinações de umidade com o aparelho utilizando-se da equação obtida apresentaram melhores índices de correlação de Pearson, coeficiente de determinação e índice de concordância, quando comparados com os resultados obtidos por meio da conversão com a tabela que acompanha o aparelho.

A análise dos resultados das determinações de umidade realizadas pelo aparelho com o uso da tabela *versus* as determinações pelo método padrão, permitiu a obtenção de um índice de correlação de Pearson (r) de 0,94, um coeficiente de determinação (r^2) de 0,89 e um índice de concordância (d) de 0,96 (Figura 11.a). O teste t resultou, para um nível de confiança de 95%, num t tabelado bicaudal de 2,11 e t observado de 0,07, não se rejeitando a hipótese H_0 .

Figura 11 - Relação entre a umidade determinada pelo Speedy com manômetro e conversão por tabela *versus* método padrão (a) e entre Speedy com manômetro e conversão pela equação obtida *versus* método padrão, com o ensaio realizado em laboratório

Analisando-se os resultados das determinações pelo aparelho com o uso da equação *versus* as determinações pelo método padrão, foram obtidos um índice de correlação de Pearson (r) de 0,96, um coeficiente de determinação (r^2) de 0,92 e um índice de concordância (d) de 0,98 (Figura 11.b). Para um nível de confiança de 95%, o teste t resultou num t tabelado bicaudal de 2,11 e t observado de 0,52, também não rejeitando a hipótese H_0 .

Evidencia-se que a utilização da equação aumenta a precisão e exatidão do sistema, uma vez que para cada valor de pressão haverá um valor correspondente em umidade. Eventualmente o valor retornado de pressão no manômetro não encontra valor correspondente na tabela do aparelho, exigindo aproximação ou interpolação de valores vizinhos, fato que pode ocasionar a perda de precisão.

Para o segundo ensaio, no qual comparou-se resultados de determinações de umidade pelo Speedy acoplado ao dispositivo de automação de leitura com determinações pelo método padrão, foram obtidos um índice de correlação de Pearson (r) de 0,97, um coeficiente de determinação (r^2) de 0,95 e um índice de concordância (d) de 0,98 (Figura 12). O teste t realizado para um nível de confiança de 5%, resultou num t tabelado bicaudal de 2,11 e t observado de 1,85, não se rejeitando a hipótese H_0 .

Figura 12 - Relação entre a umidade determinada pelo Speedy acoplado ao dispositivo de automação *versus* umidade determinada pelo método padrão, para o ensaio realizado em laboratório

Os resultados evidenciam uma pequena elevação na precisão (r), que pode ser explicada pela substituição do manômetro do aparelho pelo dispositivo de automação.

2.11.3 Avaliação do dispositivo em campo

Com os dados obtidos a partir da metodologia descrita, construiu-se um gráfico relacionando os valores de umidade determinados pelo Speedy com os determinados através do método padrão (Figura 13).

Figura 13 - Relação entre a umidade determinada pelo Speedy *versus* a umidade determinada pelo método padrão, para o ensaio realizado em campo

Verificou-se um índice de correlação de Pearson (r) de 0,93, um coeficiente de determinação (r^2) de 0,87 e um índice de concordância (d) de 0,90. O teste t realizado para um nível de confiança de 95% resultou num t tabelado bicaudal de 2,02 e num t observado de 6,73, rejeitando-se a hipótese H_0 .

Apesar dos índices resultarem valores satisfatórios, pelo teste t não se pode afirmar que as médias das determinações pelo Speedy e pelo método padrão são iguais. Isto ocorreu devido ao método do carbureto subestimar as leituras quando em faixas de umidade acima de 30%, especialmente em solos com textura argilosa. É importante citar que, apesar de ambos pertencerem à classe textural argilosa, o solo utilizado nos ensaios em laboratório possui um teor de argila de 39,4%, enquanto que no solo do ensaio em campo o teor é de 62,4%.

Para ajustar os valores das determinações pelo Speedy e aproximar sua média com a média obtida pelo método padrão, recomenda-se a utilização da eq. (31), proveniente da regressão apresentada na Figura 13.

$$U_p = 1,22 \cdot U_s - 2,13 \quad (31)$$

em que:

U_p : umidade pelo método padrão; %

U_s : umidade determinada pelo Speedy; %

A eq. (31) só deve ser considerada válida para as condições do solo estudado.

2.11.4 Primeiro sistema

O objetivo do primeiro sistema foi apresentar num display o valor de umidade do solo, não oferecendo qualquer capacidade de processamento ou armazenamento dessa informação. É o dispositivo mais simples e de menor custo, entretanto mostrou-se apto para fins de avaliação das determinações de umidade.

O conjunto formado pelo medidor de umidade mais o dispositivo para conversão estruturou-se de forma a permitir a conexão do sensor de pressão ao cilindro do Speedy (Figura 14), no local em que era instalado o manômetro tipo *bourdon*, agora não mais utilizado.

Figura 14 - Conexão do sensor de pressão com o cilindro do aparelho

Um cabo fez a ligação dos terminais do respectivo sensor até a caixa do dispositivo eletrônico, onde através de uma placa de circuito impresso, conectou-se o mesmo ao conversor A/D. Na Figura 15, tem-se a visão geral das ligações no interior do dispositivo.

Figura 15 – Visão geral do interior do dispositivo eletrônico

Ainda pelo circuito impresso, fez-se as ligações tanto do conversor A/D com o microcontrolador Basic Step, quanto do microcontrolador com o visor de cristal líquido. Na Figura 16 encontra-se o diagrama de blocos que esquematiza as ligações.

Figura 16 - Diagrama de blocos do primeiro sistema

O funcionamento do dispositivo fundamenta-se na geração de sinais analógicos de 0,2 a 4,7 Vcc pelo sensor Motorola, em função da pressão desenvolvida no interior do Speedy. Esses sinais, para poderem ser processados pelo Basic Step, necessitam ser convertidos a digitais, tarefa realizada pelo conversor A/D. O Basic Step, através do programa elaborado, lê os sinais digitais fornecidos pelo A/D e processa-os a um determinado valor, o qual, em seguida, é lançado à equação de conversão. Por fim, o programa envia o resultado obtido pela equação para ser apresentado ao usuário através do visor de cristal líquido. Assim, o programa desenvolvido é

responsável pelo controle das operações desde o conversor A/D até o visor. O dispositivo funciona com tensões de alimentação de 7,5 a 15 Vcc, que podem ser fornecidas por fonte de corrente contínua ou bateria de 9 Vcc.

O Basic Step possui um compilador próprio, desenvolvido pelo mesmo fabricante, específico para sua programação. Este é relativamente simples de ser operado, já que utiliza a linguagem *Basic*, aceita comandos tanto em português quanto em inglês e funciona em ambiente Windows. Utilizando-se dos comandos disponíveis pelo compilador, desenvolveu-se o programa para controle do dispositivo, vindo este a ocupar 154 bytes dos 256 disponíveis.

2.11.5 Segundo sistema

O segundo sistema consiste na leitura do valor de pressão diretamente por um computador de baixa capacidade de processamento, podendo utilizar desde o sistema operacional MS-DOS e contendo pelo menos uma porta paralela.

Para a realização da comunicação entre o medidor de umidade e a porta paralela do computador, utilizou-se do sensor de pressão, do conversor A/D e de outros componentes de eletrônica básica.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 17 esquematiza a composição do segundo sistema.

Figura 17 - Diagrama de blocos do segundo sistema

O funcionamento do dispositivo fundamenta-se na geração de sinais analógicos de 0,2 a 4,7 Vcc pelo sensor Motorola, em função da pressão desenvolvida no interior do Speedy. Esses sinais são transformados em digitais (0 e 1 ou nível alto e baixo) pelo conversor A/D, que os envia, através da porta paralela, ao programa no computador.

Para gerar uma tensão de alimentação constante tanto ao A/D quanto ao sensor, fez-se uso de um regulador de tensão, modelo 7805. Dois diodos emissores de luz (led's) foram instalados, com a função de sinalizar se o sistema está ligado e se há comunicação com o programa.

Para a conexão do dispositivo com o sensor fixado na tampa do Speedy, utilizou-se de um cabo e de conectores macho e fêmea tipo PS/2, comumente empregados em mouses e teclados. O

dispositivo construído, bem como suas conexões com o sensor e com o microcomputador estão apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Estruturação do segundo sistema: dispositivo construído, microcomputador e conexões

O programa para controle deste sistema foi desenvolvido em linguagem basic, cuja principal vantagem é a possibilidade de funcionamento tanto em computadores novos quanto em mais antigos. Esse fator vem se mostrando importante por permitir a reutilização de computadores velhos, de baixo custo e que normalmente seriam descartados. Tem-se como outra vantagem, a facilidade de programação.

Suas principais limitações são funcionar em ambiente MS-DOS e não permitir registro dos dados nem funcionamento simultâneo de outros programas.

Da forma pela qual ele está constituído, permite a seleção da massa da amostra considerada, representada por “ μ ” na equação de conversão apresentada anteriormente. Em função do valor escolhido, o programa retorna com a umidade da amostra. Na Figura 19, tem-se uma ilustração do programa em funcionamento.

Figura 19 - Programa desenvolvido em Qbasic para o segundo sistema, em funcionamento

É importante citar que o programa permanece obtendo as leituras do Speedy até que se pressione uma tecla qualquer no teclado, interrompendo a medição.

2.11.6 Terceiro sistema

Estruturalmente, o terceiro e o segundo sistemas são semelhantes, uma vez que utilizam dos mesmos componentes. Duas são as principais diferenças: o ambiente de programação e a possibilidade de comunicação paralela, serial ou via USB (serial em alta velocidade), caso se faça uso de um cabo conversor USB-serial, facilmente encontrado em lojas especializadas.

O desenvolvimento de um programa em Delphi para controle do sistema, foi motivado principalmente pela maior facilidade de operação, maior disponibilidade de recursos, possibilidade de funcionamento simultâneo de outros inúmeros programas e possuir todas as características do sistema operacional Windows.

O programa foi elaborado de maneira a permitir alteração de todas as variáveis da equação fundamental do Speedy. Isso possibilita a utilização de outros cilindros, como por exemplo uma panela de pressão, para determinação da umidade por esse método, uma vez que pode-se variar o volume do recipiente no programa. As configurações padrões do Speedy,

entretanto, estão salvas de modo a tornar possível restaurá-las caso tenha sido modificado algum dos parâmetros.

Para o cálculo da lâmina de irrigação, o programa permite configuração dos parâmetros necessários, sendo que, pela rotina de cálculo implementada, estes são a densidade global do solo (g cm^{-3}), a umidade com base em massa na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente (%), a profundidade do sistema radicular da cultura (cm) e o fator de disponibilidade hídrica da cultura.

As equações que permitem a determinação da lâmina de irrigação são apresentadas a seguir.

$$DTA = \left(\frac{U_{cc} - U_{pmp}}{10} \right) \cdot Z \cdot dg \quad (32)$$

em que:

DTA: disponibilidade total de água; mm

U_{cc} : umidade com base em massa na capacidade de campo; %

U_{pmp} : umidade com base em massa no ponto de murcha permanente, %

Z: profundidade do sistema radicular; cm

dg : densidade global do solo; g cm^{-3}

$$DRA = DTA \cdot f \quad (33)$$

em que:

DRA: disponibilidade real de água; mm

f: fator de disponibilidade da cultura;

$$U_c = \frac{\left(\frac{U_{cc} \cdot dg \cdot Z}{10} \right) - DRA}{dg \cdot Z} \cdot 10 \quad (34)$$

em que:

U_c : umidade crítica com base em massa; %

$$L = \left(\frac{U_{cc} - U_a}{10} \right) \cdot Z \cdot dg \quad (35)$$

em que:

L: lâmina bruta de irrigação recomendada; mm

U_a : umidade atual do solo com base em massa; %

A umidade atual do solo é medida através do Speedy e lida continuamente pelo programa. Através de um botão, o usuário informa ao programa para calcular a lâmina. Como resposta, obtém-se os valores de DTA, DRA, U_c e L .

O programa permite o registro dos dados num arquivo em formato texto, e em função das leituras anteriores, apresenta uma umidade média. O usuário pode optar pelo cálculo da lâmina com a umidade atual média das leituras anteriores. Isso se torna interessante quando a determinação da lâmina se dá através da umidade atual determinada através de vários pontos amostrais.

Pode-se eliminar as leituras de todos ou somente do último ponto da memória do programa, caso se deseje obter a umidade média de outra área, sem fechar o programa. Os dados removidos continuarão registrados no arquivo texto.

A Figura 20 apresenta a tela principal do programa.

A interface do programa 'Medidor de Umidade Tipo Speedy' apresenta o seguinte layout:

- Barra de Título:** Garzella, T.C.; Botrel, T.A.; Medidor de Umidade Tipo Speedy
- Botões de Configuração:** 'Definir Variáveis para Umidade', 'Definir Variáveis para Lâmina' e 'Calcular' (destacado com uma borda tracejada).
- Campos de Dados:**
 - Umidade Atual (%): 20.94
 - Pontos Analisados: 2
 - Umidade Média (%): 20.94
 - DTA (mm): 41.58
 - DRA (mm): 24.95
 - Ucrítica (%): 18.40
 - Lâmina Sugerida (mm): 9.20
- Nome do Ponto:** Campo de texto para entrada de identificação.
- Imagem:** Ilustração de um equipamento de medição de umidade (Speedy) sobre um fundo verde.
- Botões de Ação:** 'Calcular com Umidade Média', 'Registrar Valores', 'Configurar Arquivo de Registro', 'Eliminar Todos os Dados' e 'Eliminar Último Dado'.

Figura 20 - Tela principal do programa desenvolvido para o terceiro sistema

As Figuras 21, 22 e 23, respectivamente apresentam as telas de configuração dos parâmetros da equação fundamental do Speedy, dos parâmetros para o cálculo da lâmina e de configuração do arquivo de registro.

The dialog box is titled "Definição das Variáveis para o Cálculo da Umidade". It contains a section labeled "Variáveis" with three input fields: "Pressão Atmosférica Local" with value 1,0336 (kgf/cm²), "Densidade de Partículas do Solo" with value 2,65 (g/cm³), and "Volume do Cilindro do Speedy" with value 0,6285 (l). Below these is a group box "Massa de Solo Úmido" containing three radio buttons: "5 gramas", "10 gramas", and "20 gramas", with "20 gramas" selected. At the bottom right are three buttons: "Salvar Alterações", "Restaurar Original", and "Cancelar".

Figura 21 - Tela de configuração dos parâmetros da equação do Speedy, para o terceiro sistema

The dialog box is titled "Definição de Variáveis para o Cálculo da Lâmina de Irrigação Recomendada". It contains two sections: "Dados do Solo" and "Dados da Cultura". The "Dados do Solo" section has three input fields: "Densidade global" with value 1,26 (g.cm-3), "Ucc" with value 25 (%), and "Upmp" with value 14 (%). The "Dados da Cultura" section has two input fields: "Profundidade do sistema radicular (Z)" with value 30 (cm) and "Fator de disponibilidade (f)" with value 0,6. At the bottom are three buttons: "Salvar Alterações", "Restaurar Original", and "Cancelar".

Figura 22 - Tela de configuração dos parâmetros para o cálculo da lâmina de irrigação, para o terceiro sistema

Figura 23 - Tela para configuração do arquivo de registro, do terceiro sistema

Toda vez que se pressiona o botão registrar valores (Figura 20), os dados são gravados no arquivo. Portanto, ao final da execução do programa, tem-se um arquivo no qual todos os dados estão registrados, permitindo a utilização dos mesmos em outros aplicativos.

O arquivo armazena além da umidade, da lâmina e dos demais parâmetros calculados, a data, a hora, o número de ordem e a identificação do ponto registrado.

Se um nome e um endereço para o arquivo não forem especificados, este será criado com o nome dados.txt, no diretório no qual o programa se encontrar. É importante citar que se o programa for executado novamente sem que se retire o arquivo criado na execução anterior, o mesmo será reescrito com os dados oriundos da nova execução do programa.

O programa descrito funcionou de forma estável, de acordo com os objetivos iniciais do projeto, mostrando-se interessante uma vez que é de simples operação, prático e de fácil modificação.

Com os dados registrados no arquivo texto, é possível a integração dos valores de umidade a planilhas eletrônicas de balanço hídrico, que considerem além de fatores da planta e do solo, de fatores climáticos.

2.11.7 Quarto sistema

É o que apresenta maior diferença em relação aos anteriores. Essencialmente, é constituído por software e dispositivo de leitura e armazenamento dos valores de umidade obtidos pelo Speedy.

O software foi desenvolvido em linguagem pascal, utilizando-se principalmente do compilador Delphi. Algumas operações de arquivos são executadas por arquivos de extensão bat, cuja linguagem de programação é muito semelhante ao do sistema operacional MS-DOS.

O diagrama de bloco apresentado na Figura 24 resume a constituição do sistema.

Figura 24 – Diagrama de blocos do quarto sistema

O dispositivo acoplado ao Speedy (Figura 25) é muito semelhante ao do primeiro sistema, uma vez que é composto por um Basic Step. As diferenças estão no modelo do Basic Step, escolhido o M8 a invés do 1, e na utilização de um dispositivo de armazenamento (driver) de memória flash. Assim, o Basic Step além de ler a pressão e converter em umidade, apresenta o valor no display e armazena num *pen drive* quando pressionado o botão correspondente.

Figura 25 – Dispositivo construído para o quarto sistema

Para o funcionamento, o dispositivo deve antes mesmo de sua inicialização, conter obrigatoriamente conectado ao driver um *pen drive*, no qual os registros são armazenados num arquivo de formato texto, podendo ser aberto normalmente num editor de texto padrão. Para fins comerciais, é possível trabalhar com arquivos criptografados, que venham a exigir software exclusivo para leitura e interpretação.

O software de balanço hídrico trata-se simplesmente de uma planilha para controle convencional das entradas e saídas da água no solo, com a vantagem de permitir a correção da água disponível à cultura utilizando as leituras de umidade do solo via Speedy.

O software está configurado de modo a permitir estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc) via tanque classe A. O operador deve informar a velocidade do vento, a umidade relativa do ar e os valores de evaporação do tanque (ECA). O coeficiente k_p do tanque é obtido diretamente pelo programa.

Para funcionamento do programa, o operador informa se o sistema de irrigação a ser utilizado é de turno de rega fixa ou variável. Monitorando a quantidade de água disponível à cultura, o programa indica o momento da irrigação, no caso de turno de rega variável, ou a lâmina necessária para se chegar à capacidade de campo, no caso de turno de rega fixo.

A Figura 26 apresenta a tela principal do programa desenvolvido.

Figura 26 – Tela principal do programa de balanço hídrico, desenvolvido para o quarto sistema

Na Figura 27, é apresentado um detalhe do menu de contexto.

Figura 27 – Detalhe do menu de contexto Ferramentas, do programa de balanço hídrico desenvolvido para o quarto sistema.

Este sistema prevê a estimativa da evapotranspiração pelo métodos de Thorntwaite com a simplificação de Camargo (apud PEREIRA et al., 2002) e de Hargreaves e Samani (apud PEREIRA et al., 2002). Para isso, seriam utilizados sensores de temperatura e umidade do ar, tendo suas leituras obtidas e armazenadas em *pen drive*, por um dispositivo semelhante ao do quarto sistema.

O programa, processando essas leituras poderia oferecer outras opções para estimação da evapotranspiração, além do método do tanque classe A, alcançando outro patamar de automatização.

3 CONCLUSÃO

Considerando-se os resultados encontrados, conclui-se que:

O método do carbureto de cálcio, implementado no medidor de umidade Speedy, apresentou resultados satisfatórios quando comparados com o método padrão, tanto na avaliação em laboratório quanto na avaliação em campo.

A automação da leitura do medidor permitiu a obtenção de índices de correlação, regressão e concordância maiores aos obtidos com o aparelho em sua constituição original, quando comparadas as determinações de umidade pelo aparelho e pelo método padrão de estufa.

Os sistemas desenvolvidos aumentaram a aplicabilidade do método do carbureto de cálcio, podendo se tornar ferramentas de auxílio ao agricultor no gerenciamento da irrigação.

REFERÊNCIAS

- AL-KUFAISHI, S. A.; BLACKMORE, B. S.; SOURELL, H. The feasibility of using variable rate water application under a central pivot irrigation system. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 20, p.317-327, august, 2006.
- ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2003. 166p.
- ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. Porto Alegre: Bookman, 2001. 345p.
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV; Impr. Universitária, Viçosa, 1995. 657 p.
- BIANCHINI, A.; MAIA, J.C.S.; MAGALHÃES, P.S.G.; CAPPELI, N.; UMEZU, C.K. Penetrógrafo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.332-336, 2002.
- BRAGA, N.C. **Curso básico de eletrônica**. São Paulo: Editora Saber, 1999. v.1 140p.
- CAMARGO, A. P.; COSTA, A.O.L. Determinação rápida da umidade do solo pelo método da reação com o carbureto de cálcio. **Bragantia**, Campinas, v.19, n. 30, p. 493-502, maio, 1960.
- CAMARGO, A.P. **Desenvolvimento de um medidor eletrônico de vazão utilizando célula de carga**. 2009. 126p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- CASTRUCCI, P.B.L. **Controle automático**: teoria e projeto. São Paulo: EDUSP, 1969. 234p.
- CHAVES, H.M.L. Sensibilidade do modelo *Hydrus* aos parâmetros hidráulicos do solo em diferentes texturas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 33-37, abr./jun. 2009.

CICHOTA, R.; **Avaliação no campo de um TDR segmentado para determinação da umidade do solo**. 2003. 100 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CLEMMER, G. **American Miners' Carbide Lamps**: a collectors guide to american carbide mine lighting. Pasadena: Westernlore Publications, 1987. 126p.

DUKES, M. D.; PERRY, C. Uniformity testing of variable-rate center pivot irrigation control systems. **Precision Agriculture**, v. 7, p. 205-218, 2006.

ENLOE, C.L.; GARNETT, E.; MILES, J.; SWANSON, S. **Physical Science**: what the technology professional needs to know. New York: Wiley, 2000. 560p.

EVANGELISTA, A.W.P.; FERREIRA, P.A. Análise de sensibilidade do sistema de drenagem agrícola-DAS mediante variação dos parâmetros de entrada. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 30, n. 1, p. 133-139, jan./fev. 2006.

FRIZZONE, J.A; BOTREL, T.A. Ensaio e certificação de sistemas e equipamentos para irrigação. In: MIALHE, J.G. **Máquinas Agrícolas**: ensaios e certificação. Piracicaba, SP: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996. 236p.

GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis I**: Physical and mineralogical methods. Madison: Soil Science Society of America, 1986. cap.21, p. 493-544.

GARZELLA, T.C.; ARMINDO, R.A.; BOTREL, T.A.; QUEIROZ, T.M. Automação da leitura de vazão de um vertedor utilizando mecanismos de rádio frequência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007. Bonito. **Anais...** Bonito: SBEA, 2007. 1 CD-ROM.

GITMAN, L.J.; **Princípios da administração financeira**. 7.ed. São Paulo: Harbra, 1997. 841 p.

GOMIDE, R. Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: FARIA, M.A.; SILVA, E.L.; VILELA, L.A.A.L PEREIRA, G.M. **Manejo de irrigação**. Poços de Caldas: SBEA/UFLA/DEG, 1988. p.133-238.

GREEN, S.R.; CLOTHIER, B.E.; Mc LEOD, D.J. The response of SAP flow in Apple roots to localized irrigation. **Agricultural Water Management**, London, v.33, p. 63-78, 1997.

GUIMARÃES, J.W.A. **Manejo do algodão irrigado no Projeto Jaguaribe – Apodi, utilizando um modelo computacional**. 1993. 231p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1993.

HEERMANN, D.F; HOETING, J.; THOMPSON, S.E.; DUKE, H.R.; WESTFALL, D.G.; BUCHLEITER, G.W; WESTRA, P.; PEAIRS, F.B.; FLEMING, K. Interdisciplinary irrigated precision farming research. **Precision Agriculture**, Essex, v. 3, p. 47-61, 2002.

HERNANDEZ, F.B.T. Manejo da irrigação por pivô central na cultura do milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1994, Viçosa – MG. **Anais...** Viçosa – MG: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1994. 13 p.

IDOETA, I.V.; CAPUANO, F.G.; **Elementos de eletrônica digital**. 40.ed. São Paulo: Érica, 2007. 525p.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2 ed. Piracicaba: P.L. Libardi, 2000. 509 p.

MASSON, I. The use of calcium carbide for determining moisture. **Chemical News**, v.103, p. 37-38, Aug. 1911.

MOREHEAD, J.T.; CHALMOT, G. The manufacture of calcium carbide. **Journal of American Chemical Society**, London, v. 18, n. 4, p. 311-331, Apr. 1916.

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

OLIVEIRA, P.N. **Comparação dos teores de umidade do solo obtidos através de cinco métodos de determinação**. 1976. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1976.

OLIVEIRA, V. R. **Manejo da água e performance hidráulica de um sistema de irrigação por gotejamento no distrito de irrigação Jaguaribe – Apodi (DIJA)**. 2000. 189p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.

OTTMAN, M.J.; POPE, N.V. Nitrogen Fertilizer Movement in the Soil as Influenced by Nitrogen Rate and Timing in Irrigated Wheat. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.64, p. 1883-1892, 2000.

PAIVA, J.E., MEDINA, H.P, DE JORGE, W. Física do solo. In: _____ **Relatório da Seção de Agrogeologia**. Campinas: Instituto agrônômico, 1951. p. 12-22.

PARKS, R.Q. **A rapid and simple method for determining moisture meter**. **Agricultural Engineering**, Madison, v4, n.7, p. 370-372, 1941.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PIEDADE, G.S.R; KLAR, A.E. Métodos rápidos para a determinação da umidade do solo. **Revista de Agricultura**, Campinas, v. 47, n. 3, p.187-196, dez. 1972.

PRENGER, J.J.; LING, P.P.; HANSEN, R.C.; KEENER, H.M. Plant response-based irrigation control system in a greenhouse: system evaluation. **Transactions of the ASAE**, London, v. 48, n.3, p. 1175-1183, 2005.

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

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo: McGraw – Hill do Brasil, 1978. 119 p.

REICHARDT, K. **Água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHARDT, K. Capacidade de Campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p. 211-216, 1988.

RIJSBERMAN, F.R. Water scarcity: fact or fiction? **Agricultural Water Management**, v.80, p. 5-22, 2006.

ROBERTS, R.W.; FRASER, A. Easy process for estimating water in petroleum. **Journal of Society of Chemical Industry**, London, v.23, n.2, p. 197-201, Jul. 1910.

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

SADLER, E.J.; CAMP, C.R.; EVANS, D.E.; MILLEN, J.A. Spatial variation of corn response to irrigation. **Transactions of the ASAE**, London, v.45, n.6, p. 1869-1881, 2002.

SADLER, E.J.; EVANS, R.G.; STONE, K.C.; CAMP, C.R. Opportunities for conservation with precision irrigation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.60, n.6, p. 371-379, 2005.

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. **Journal of Agricultural Meteorology**, Bethesda, v.37, p.9-17, 1981.

SILVA, K.O. **Desenvolvimento de sistema automatizado de baixo custo para aquisição de dados de umidade e temperatura do ar**. 2000. 70p. Dissertação (Mestrado Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SILVA, A.L. **Variabilidade dos componentes do balanço hídrico: um estudo de caso em uma cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no Brasil**. 2005. 72 p. Tese (Doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SOARES, J.M. **Manejo da Irrigação**. In: Informações Técnicas sobre a cultura da manga no semi-árido brasileiro. Brasília, D.F: EMBRAPA – SPI, 1995. 222p.

SOUZA, L.D. **Estimativas e utilização da capacidade de campo**. 1989. 126 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

SOUZA, F. **Manejo computadorizado da irrigação utilizando o programa da FAO: estudo de caso de híbridos de milho (*Zea mays*, L) no vale do Curu-Ceará.** 1992. 244p. Tese (Concurso Professor Titular), Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1992.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Publications in climatology**, New York, Drexel Inst. of Technology, 1955. 104p.

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

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

VILLANI, M.G.; WRIGHT, R.J. Environmental influences on soil macroarthropod behavior in agriculture systems. **Annual Review of Entomology**, Palo Alto, v. 35, p. 249-269, 1990.

WEST, R.M. The determination of moisture in syrups by the calcium carbide method. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, London, v. 8, n. 1, p.31-35, Jan. 1916.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Phisycal Geography**, Stockholm, v.2, p. 184-194, 1981.

ANEXOS

Anexos A – Rotinas desenvolvidos para o microcontrolador Basic Step

' LEGENDA

Symbol CLK = 0	'Clock no pino 0
Symbol DO = 1	'Saída digital no pino 1
Symbol DOpin = pin1	'Indicação do pino de DO
Symbol DI = 2	'Entrada digital do AD no pino 2
Symbol DIpin = pin2	'Indicação do pino de DI
Symbol CS = 3	'Controle de ativação do AD no pino 3
Symbol LCD = 4	'Saída para LCD no pino 4
Symbol ADbits = b1	'Variável para recepção de bits
Symbol AD = w1	'Variável que armazena resultados
Symbol A = w2	'Variável para desenvolvimento do cálculo
Symbol B = w3	'Variável para desenvolvimento do cálculo
Symbol ligse = 1	'Ligações single-ended
Symbol outOs = 1	'Saída Os depois que termina transferência
Symbol cmd = 254	'Código de conversão do LCD
Symbol limpa = 1	'Limpa display
Symbol inicio = 2	'Posiciona display no início

' VARIÁVEL

Symbol Mu = 20	'Massa (g) de solo colocado no Speedy
----------------	---------------------------------------

' GERAL

high CS	'Desativa AD para iniciar
comeco: for bit0 = 0 to 1	'Alterna canais de entrada
gosub conversao	'Obtenção de dados do AD
if bit0 = 0 then Display_CH0	'Mostra valor de CH0 no LCD
pause 1000	
continua:	
next	'Vai ao próximo bit
goto comeco	'Retorna ao começo

' CONVERSÃO

conversao:	
low CLK	'Ativa o clock
high DI	'Início do bit
low CS	'Habilita o conversor

pulsout CLK,5	'Envia bit inicial
let DIpin=ligse	'Começa o próximo bit
pulsout CLK,5	'Envia o bit
let DIpin=bit0	'Inicia segundo bit
pulsout CLK,5	'Envia o bit
let DIpin=outOs	'Final da formatação do bit
pulsout CLK,5	'Envia o bit pronto
input DO	'Prepara pino do DO como entrada
let AD=0	'Zera resultados do AD
for ADbits=1 to 8	'Coleta todos os bits
let AD=AD*2+DOpin	'Posiciona e adiciona novo bit de dados
pulsout CLK,5	'Temporiza a nova entrada de bit
next	'Obtém o próximo bit de dados
high CS	'Desabilita o conversor
gosub transformacao	'Vai para rotina de conversão em volts
return	'Retorna à rotina geral
<hr/>	
' TRANSFORMAÇÃO	
<hr/>	
transformacao:	'Transformação em pressão
let AD=AD*310	
let AD=AD-2962	
let A=AD+10336/1705	'Transformação em umidade
let A=10000-A	
let A=Mu/10*A	
let B=AD/10	
let B=1034+B/10*63/64	
let B=62850/6226+100*10-B	
let B=Mu*100+B-1000	
let B=B/10	
let B=A/B-100	
return	'Retorna à rotina conversão
<hr/>	
' DISPLAY	
<hr/>	
Display_CH0:	
serout LCD,n2400,(cmd,limpa)	'Prepara LCD
serout LCD,n2400,(#B," %")	
goto continua	'Retorna à rotina geral

Anexo B – Rotina do programa criado no QBASIC, para o segundo sistema.

```

10 CLS
20 GOSUB 250
25 REM***ROTINA DE CÁLCULO***
30 LOCATE 3, 20: PRINT " CALCULO DA UMIDADE DA AMOSTRA - SPEEDY"
40 LOCATE 8, 3: PRINT " MASSA DA AMOSTRA (5, 10 ou 20 gramas): "
50 LOCATE 16, 3: PRINT " UMIDADE: "
60 LOCATE 8, 43: INPUT MASSA
65 IF MASSA <> 5 AND MASSA <> 10 AND MASSA <> 20 THEN GOTO 40
70 GOSUB 420
72 A = (.031 * AD) - .2962
75 LOCATE 10, 4: PRINT "O VALOR DE PRESSÇO  :"; A; "kgf/cm2"
80 B = (1 - ((A + 1.0336) / (2650 * 1.0336 * .6226))) * (MASSA * 100)
90 C = (.6285 / .6226) - (((A + 1.0336) * .6285) / (1.0336 * .6226)) + MASSA
100 UM = (B / C) - 100
110 LOCATE 16, 13: PRINT UM; "%"
150 DO WHILE INKEY$="": LOOP
240 END
250 REM***ROTINA DE TELA***
260 LOCATE 1, 1: PRINT CHR$(201)
270 LOCATE 1, 80: PRINT CHR$(187)
280 LOCATE 20, 1: PRINT CHR$(200)
290 LOCATE 20, 80: PRINT CHR$(188)
300 FOR I = 2 TO 79
310 FOR J = 2 TO 19
320 LOCATE 1, I: PRINT CHR$(205)
330 LOCATE 20, I: PRINT CHR$(205)
340 LOCATE J, 1: PRINT CHR$(186)
350 LOCATE J, 80: PRINT CHR$(186)
360 NEXT J
370 NEXT I
380 FOR I = 2 TO 79
390 LOCATE 6, I: PRINT CHR$(196)
400 NEXT I
410 RETURN
420 REM ***LEITURA DO A/D***
460 OUT 888, 2
470 OUT 888, 3
480 OUT 888, 0
490 OUT 888, 1
500 OUT 888, 0
510 OUT 888, 1
520 VALOR = 0
530 FOR I = 0 TO 7
540 OUT 888, 0
550 VALOR = (VALOR * 2) + INP(889)
560 OUT 888, 1
570 NEXT I
580 OUT 888, 4
590 AD = VALOR
600 RETURN

```


Anexo C – Código fonte do programa criado em Delphi, para o terceiro sistema.

```
unit Pspeedy_07;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,  
StdCtrls, ExtCtrls, IOport, Math, Pdados_07, Plamina_07, Pregistro_07, jpeg;
```

```
type
```

```
TSpeedy = class(TForm)  
  Btnregistrar: TButton;  
  GBUmedida: TGroupBox;  
  lblUmed: TLabel;  
  Timer1: TTimer;  
  IOport: TIOport;  
  btncalcular: TButton;  
  GBlamina: TGroupBox;  
  lbllamina: TLabel;  
  GBdta: TGroupBox;  
  GBdra: TGroupBox;  
  lbldta: TLabel;  
  lbldra: TLabel;  
  GBUC: TGroupBox;  
  lblUC: TLabel;  
  lblbateria: TLabel;  
  btnVar_Speedy: TButton;  
  btnVar_Lamina: TButton;  
  GBpontos: TGroupBox;  
  lblN_ponto: TLabel;  
  GBUmedia: TGroupBox;  
  lblUmedia: TLabel;  
  btncalc_media: TButton;  
  btnDelUltimo: TButton;  
  btnDel_all: TButton;  
  lblNome_ponto: TGroupBox;  
  edtNome_Ponto: TEdit;  
  Image1: TImage;  
  btnregistro: TButton;  
  procedure Timer1Timer(Sender: TObject);  
  procedure BtnregistrarClick(Sender: TObject);  
  procedure btncalcularClick(Sender: TObject);  
  procedure FormActivate(Sender: TObject);  
  procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);  
  procedure btnVar_SpeedyClick(Sender: TObject);  
  procedure btnVar_LaminaClick(Sender: TObject);
```

```

procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure btnDelUltimoClick(Sender: TObject);
procedure btnDel_allClick(Sender: TObject);
procedure btncalc_mediaClick(Sender: TObject);
procedure btnregistroClick(Sender: TObject);

private
  { Private declarations }
function LerADCanal(Canal:integer):integer;
public
  { Public declarations }
end;

var
  Speedy: TSpeedy;
  // ArqDados:TextFile; //Declara variável de registro
  Y, DTA, DRA, UC, Lam: extended;
  umidade:string;
  UMED, Ultima_UMED: currency;
  P: extended;
  Ordem: integer;
  soma, N_ponto, media: currency;
implementation

{$R *.DFM}

//Dados iniciais
procedure TSpeedy.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  AssignFile (ArqDados, extractfilepath(application.exename)+'\dados.txt');
  Rewrite (ArqDados);
  Writeln (ArqDados, '=====');
  Writeln (ArqDados, 'Medidor de Umidade Speedy (v 1.1)');
  Writeln (ArqDados, '=====');
  Writeln (ArqDados, 'Universidade de São Paulo');
  Writeln (ArqDados, 'Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz');
  Writeln (ArqDados, 'Garzella,T.C; Botrel,T.A.');
```

```

  Writeln (ArqDados, '=====');
  Writeln (ArqDados, '');
  Writeln (ArqDados, 'Data; Hora; N.Ordem; N_Ponto; Nome_Ponto;
  U_atual(%);DTA(mm);DRA(mm);Uc(%); Lamina(mm)');
  Closefile (ArqDados);
  Patm:= 1.0336;
  dp:=2.65;
  Vs:=0.6285;
  Mu:=20;

```

```

DG:=1.26;
UCC:=33;
UPMP:=20;
Z:=1;
F:=0.6;
ordem:=0;
soma:=0;
N_ponto:= 0;
btnDelUltimo.visible:=false;
btnDel_All.visible:=false;
IOport.PortAddress:=$37A;
IOport.PortData:=$2; //...0010
IOport.Write;
end;
//Criar arquivo de registro e configurações iniciais
procedure TSpeedy.FormActivate(Sender: TObject);
begin
IOport.PortAddress:=$37A;
IOport.PortData:=$2; //...0010
IOport.Write;
end;
//chamar form variavel umidade
procedure TSpeedy.btnVar_SpeedyClick(Sender: TObject);
begin
Dados.Show;
end;
//chamar form variavel lamina
procedure TSpeedy.btnVar_LaminaClick(Sender: TObject);
begin
Lamina.Show;
end;
//ler AD
function TSpeedy.LerADCanal(Canal:integer):integer;
var
i :integer;
valor :Byte;
begin
IOport.PortAddress:=$378; //Endereçando o multiplexador do AD
//Start bit
IOport.PortData:=$2; //...010 /CS=d2 DI=d1 CLK=d0
IOport.Write;
IOport.PortData:=$3; //...011
IOport.Write;
//[SGL]/DIF
IOport.PortData:=$2; //...010
IOport.Write;
IOport.PortData:=$3; //...011

```

```

IOport.Write;
//[ODD]/SGN
IOport.PortData:=$2 and (2*Canal); //...0?0
IOport.Write;
IOport.PortData:=( $2 and (2*Canal)) or $1; //...0?0
IOport.Write;
//Mux S.Time
IOport.PortData:=$0; //...000
IOport.Write;
IOport.PortData:=$1; //...001
IOport.Write;

Valor:=0;

for i:=0 to 7 do
begin
  IOport.PortAddress:=$378;
  IOport.PortData:=$0;
  IOport.Write;

  IOport.PortAddress:=$379;
  IOport.Read;
  // Valor:=Valor or (((IOport.PortData and $08) shr 3) shl i);
  Valor:=Valor or (((IOport.PortData and $08) shl 4) shr i);

  IOport.PortAddress:=$378;
  IOport.PortData:=$1; //...001
  IOport.Write;
end;

result:=Valor;

IOport.PortAddress:=$378;
IOport.PortData:=$0; //...000
IOport.Write;

for i:=1 to 16 do
begin
  IOport.PortData:=$1 and (i mod 2); //...00x
  IOport.Write;
end;
//
// for i:=1 to 16 do
// begin
//   IOport.PortData:=$1 and (i mod 2); //...00x
//   IOport.Write;
// end;

```

```

//
IOport.PortData:=$4; //...100 /CS=d2 DI=d1 CLK=d0
IOport.Write;
end;
//temporizar leitura
procedure TSpeedy.Timer1Timer(Sender: TObject);
var
Y:extended;
X:currency;
bateria:currency;
a0, a1, a2, a3, a4, a5: extended;
UMED_text: string;
begin //Canal 0 na série 0
Y:=LerADCCanal(1);
X:=LerADCCanal(0);
bateria:=(X+0.2739)/51.56;
if bateria <= 4 then
lblbateria.caption:='Bateria fraca! Substitua assim que possível.';
if bateria > 4 then
lblbateria.caption:='';
//Conversão a Pressão
P:=(0.031*Y)-0.2962;
//p:=1.963;
//Cálculo Umidade
a0:=DP*1000;
a1:=P+Patm;
a2:=a0*Patm*0.6226;
a3:=(1-(a1/a2))*100*Mu;
a4:=(a1*Vs)/(Patm*0.6226);
a5:=(Vs/0.6226)-a4+Mu;
UMED:=(a3/a5)-100;
Str(UMED:4:2,UMED_text);
lblUmed.caption:=UMED_text;
end;

//Cálculo da Lâmina e Umedia
procedure TSpeedy.btncalcularClick(Sender: TObject);
var
DTA_text, DRA_text, UC_text, Lam_text, Media_text:string;
begin
DTA:=((UCC-UPMP)/10)*DG*Z;
DRA:=DTA*F;
UC:=(((UCC*DG*Z/10)-DRA)/(DG*Z))*10;
Lam:=((UCC-UMED)/10)*DG*Z*F;
N_ponto:= N_ponto + 1;
Ultima_UMED:=UMED;
soma:=Ultima_UMED+soma;

```

```
media:=soma / N_ponto;
```

```
Str(DTA:4:2,DTA_text);
Str(DRA:4:2,DRA_text);
Str(UC:4:2,UC_text);
Str(Lam:4:2,Lam_text);
Str(media:4:2,media_text);
```

```
lblUmedia.caption:=media_text;
lblN_ponto.caption:=FloatToStr(N_ponto);
lblDTA.caption:=DTA_text;
lblDRA.caption:=DRA_text;
lblUC.caption:=UC_text;
lblLamina.caption:=Lam_text;
```

```
btnDel_All.visible:=true;
btnDelUltimo.visible:=true;
if N_ponto=1 then btnDelUltimo.visible:=false;
end;
//Fim do cálculo da lâmina
//calcular lamina com Umedia
procedure TSpeedy.btnCalc_mediaClick(Sender: TObject);
var
Lam_text:string;
begin
Lam:=((UCC-media)/10)*DG*Z*F;
Str(Lam:4:2,Lam_text);
lblLamina.caption:=Lam_text;
end;
```

```
//eliminar último dado
procedure TSpeedy.btnDelUltimoClick(Sender: TObject);
var
media:currency;
media_text: string;
begin
N_ponto:=N_ponto-1;
lblN_ponto.caption:=FloatToStr(N_ponto);
soma:=soma-Ultima_UMED;
media:=soma/N_ponto;
Str(media:4:2,media_text);
lblUmedia.caption:=media_text;
btnDelUltimo.visible:=false;
end;
//eliminar todos os dados
procedure TSpeedy.btnDel_allClick(Sender: TObject);
begin
```

```

if application.MessageBox('Deseja eliminar todos os dados?',
'Confirmação de Exclusão', mb_YesNo)= IDYes then
    begin
        soma:=0;
        N_ponto:= 0;
        lblN_ponto.caption:=FloatToStr(N_ponto);
        btnDelUltimo.visible:=false;
        Ultima_UMED:=0;
        lblUmedia.caption:="";
        btnDel_All.visible:=false;
    end;
end;
//Registrar Valores
procedure TSpeedy.BtnregistrarClick(Sender: TObject);
var
    DateTime: TDateTime;
    Data: string;
    Hora: string;
    Ordem_text:string;
begin
    //AssignFile (ArqDados, extractfilepath(application.exename)+'\Dados.txt');
    AssignFile (ArqDados, endereco + '\' + arquivo+'.txt');
    If endereco="" then AssignFile (ArqDados,
extractfilepath(application.exename)+'\'+arquivo+'.txt');
    if arquivo="" then AssignFile (ArqDados, extractfilepath(application.exename)+'\Dados.txt');
    Append(ArqDados);
    DateTime:= Time;
    Data:= DateToStr(Date);
    Hora:= TimeToStr(DateTime);
    ordem:= ordem + 1;
    ordem_text:=IntToStr(ordem);
    Writeln (ArqDados,
Data,',',hora,',',ordem_text,',',lblN_ponto.caption,',',edtNome_Ponto.text,',',lblUmed.caption,',',lbl
DTA.caption,',',lblDRA.caption,',',lblUC.caption,',',lbllamina.caption);
    Closefile (ArqDados);
    edtNome_Ponto.text:="";
end;
//Fechar Forms
procedure TSpeedy.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
    IOport.PortAddress:=$37A;
    IOport.PortData:=$0; //...1000
    IOport.Write;
end;

procedure TSpeedy.btnregistroClick(Sender: TObject);
begin

```

```

Registro.show;
end;

```

```

end.

```

```

unit Pdados_07;

```

```

interface

```

```

uses

```

```

    Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
    ExtCtrls, StdCtrls;

```

```

type

```

```

    TDados = class(TForm)
        GBvariaveis: TGroupBox;
        lblPatm: TLabel;
        lblDP: TLabel;
        lblVs: TLabel;
        edtPatm: TEdit;
        edtDP: TEdit;
        edtVs: TEdit;
        lblU_Patm: TLabel;
        lblU_DP: TLabel;
        lblU_Vs: TLabel;
        RGmassasolo: TRadioGroup;
        btnPadrao: TButton;
        btnConfirmar: TButton;
        edtMu: TEdit;
        btncancelar: TButton;
        procedure btnPadraoClick(Sender: TObject);
        procedure btnConfirmarClick(Sender: TObject);
        procedure edtPatmKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
        procedure edtDPKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
        procedure edtVsKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
        procedure btncancelarClick(Sender: TObject);

```

```

    private

```

```

        { Private declarations }

```

```

    public

```

```

        { Public declarations }

```

```

end;

```

```

var

```

```

    Dados: TDados;

```

```

    P, Patm, dp, Mu, Vs: extended;

```

```

implementation

```



```
{ $R *.DFM }
```

```
procedure TDados.btnPadraoClick(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
edtPatm.text:='1'+decimalseparator+'0336';
```

```
edtDP.text:='2'+decimalseparator+'65';
```

```
edtVs.text:='0'+decimalseparator+'6285';
```

```
edtMu.text:='20';
```

```
RGmassasolo.ItemIndex:=2;
```

```
Patm:=StrToFloat(edtPatm.text);
```

```
DP:=StrToFloat(edtDP.text);
```

```
Vs:=StrToFloat(edtVs.text);
```

```
Mu:=StrToFloat(edtMu.text);
```

```
end;
```

```
procedure TDados.btnConfirmarClick(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
if edtPatm.text='0' then edtPatm.text:='1'+decimalseparator+'0336';
```

```
if edtPatm.text='' then edtPatm.text:='1'+decimalseparator+'0336';
```

```
if edtdp.text='0' then edtDP.text:='2'+decimalseparator+'65';
```

```
if edtdp.text='' then edtDP.text:='2'+decimalseparator+'65';
```

```
if edtVs.text='0' then edtVs.text:='0'+decimalseparator+'6285';
```

```
if edtVs.text='' then edtVs.text:='0'+decimalseparator+'6285';
```

```
if RGmassasolo.ItemIndex=-1 then RGmassasolo.ItemIndex:=2;
```

```
Patm:= StrToFloat(edtPatm.text);
```

```
dp:= StrToFloat(edtDP.text);
```

```
Vs:= StrToFloat(edtVS.text);
```

```
case RGmassasolo.Itemindex of
```

```
0:begin
```

```
    Mu:=5;
```

```
    end;
```

```
1:begin
```

```
    Mu:=10;
```

```
    end;
```

```
2:begin
```

```
    Mu:=20;
```

```
    end;
```

```
end;
```

```
edtMu.text:=FloatToStr(Mu);
```

```
Mu:=STrToFloat(edtMu.text);
```

```
Close;
```

```
end;
```

```
//permitir só separador decimal
```

```
procedure TDados.edtPatmKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
```

```
begin
```

```
if Key = '.' then Key:= DecimalSeparator;
```

```

end;
procedure TDados.edtDPKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if Key = '.' then Key:= DecimalSeparator;
end;
procedure TDados.edtVsKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if Key = '.' then Key:= DecimalSeparator;
end;

procedure TDados.btncancelarClick(Sender: TObject);
begin
Close;
end;

end.

unit Plamina_07;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls;

type
  TLamina = class(TForm)
    GBvariaveis: TGroupBox;
    btnPadrao: TButton;
    btnConfirmar: TButton;
    GBsolo: TGroupBox;
    lbldensidade: TLabel;
    lblUdensidade: TLabel;
    lblUcc: TLabel;
    lblUpmp: TLabel;
    lblUUcc: TLabel;
    lblUUpmp: TLabel;
    edtDG: TEdit;
    edtUcc: TEdit;
    EdtUpmp: TEdit;
    GBcultura: TGroupBox;
    lblZ: TLabel;
    Label1: TLabel;
    lblUZ: TLabel;
    edtZ: TEdit;
    edtF: TEdit;
    btncancelar: TButton;
  end;

```

```

procedure btnPadraoClick(Sender: TObject);
procedure btnConfirmarClick(Sender: TObject);
procedure edtDGKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure edtUccKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure EdtUpmpKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure edtZKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure edtFKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure btncancelarClick(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

var
  Lamina: TLamina;
  UCC, UPMP, DG, Z, F: extended;
implementation

{$R *.DFM}

```

```

procedure TLamina.btnPadraoClick(Sender: TObject);
begin
  edtDG.text:='1'+decimalseparator+'26';
  edtUCC.text:='33';
  edtUPMP.text:='20';
  edtZ.text:='1';
  edtF.text:='0'+decimalseparator+'6';
  DG:=StrToFloat(edtDG.text);
  UCC:=StrToFloat(edtUCC.text);
  UPMP:=StrToFloat(edtUPMP.text);
  Z:=StrToFloat(edtZ.text);
  F:=StrToFloat(edtF.text);
end;

```

```

procedure TLamina.btnConfirmarClick(Sender: TObject);
begin
  if edtDG.text='0' then edtDG.text:='1'+decimalseparator+'26';
  if edtDG.text="" then edtDG.text:='1'+decimalseparator+'26';
  DG:=StrToFloat(edtDG.Text);
  if edtUCC.text='0' then edtUCC.text:='33';
  if edtUCC.text="" then edtUCC.text:='33';
  UCC:=StrToFloat(edtUcc.Text);
  if edtUPMP.text="" then edtUPMP.text:='20';
  UPMP:=StrToFloat(edtUpmp.Text);
  if edtZ.text='0' then edtZ.text:='1';
  if edtZ.text="" then edtZ.text:='1';

```

```

Z:=StrToFloat(edtZ.Text);
if edtF.text='0' then edtF.text:='0'+decimalseparator+'6';
if edtF.text="" then edtF.text:='0'+decimalseparator+'6';
F:=StrToFloat(edtF.Text);
Close;
end;

//Permitir só separador decimal
procedure TLamina.edtDGKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if Key = '.' then Key:= DecimalSeparator;
end;
procedure TLamina.edtUccKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if Key = '.' then Key:= DecimalSeparator;
end;
procedure TLamina.EdtUpmpKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if Key = '.' then Key:= DecimalSeparator;
end;
procedure TLamina.edtZKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if Key = '.' then Key:= DecimalSeparator;
end;

procedure TLamina.edtFKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if Key = '.' then Key:= DecimalSeparator;
end;

procedure TLamina.btncancelarClick(Sender: TObject);
begin
Close;
end;

end.

unit Pregistro_07;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls;

type
  TRegistro = class(TForm)

```

```

    lbllocal: TLabel;
    edtcaminho: TEdit;
    lblnome: TLabel;
    edtarquivo: TEdit;
    btnConfirmar: TButton;
    btnPadrao: TButton;
    btncancelar: TButton;
    lbltxt: TLabel;
    procedure btnConfirmarClick(Sender: TObject);
    procedure btnPadraoClick(Sender: TObject);
    procedure btncancelarClick(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Registro: TRegistro;
    ArqDados: TextFile;
    Endereco, arquivo: string;
implementation

{$R *.DFM}

procedure TRegistro.btnConfirmarClick(Sender: TObject);
begin
    endereco:=edtcaminho.text;
    arquivo:=edtarquivo.text;
    AssignFile (ArqDados, endereco+'\'+arquivo+'.txt');
    If endereco="" then AssignFile (ArqDados,
    extractfilepath(application.exename)+'\'+arquivo+'.txt');
    Rewrite (ArqDados);
    Writeln (ArqDados, '=====');
    Writeln (ArqDados, 'Medidor de Umidade Speedy (v 1.1)');
    Writeln (ArqDados, '=====');
    Writeln (ArqDados, 'Universidade de São Paulo');
    Writeln (ArqDados, 'Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz');
    Writeln (ArqDados, 'Garzella,T.C; Botrel,T.A.');
```

Writeln (ArqDados, '=====');

Writeln (ArqDados, ");

Writeln (ArqDados, 'Data; Hora; N.Ordem; N_Ponto; Nome_Ponto;

U_atual(%);DTA(mm);DRA(mm);Uc(%); Lamina(mm)');

Closefile (ArqDados);

Close;

end;

```

procedure TRegistro.btnPadraoClick(Sender: TObject);
begin
AssignFile (ArqDados, extractfilepath(application.exename)+'\Dados.txt');
Rewrite (ArqDados);
Writeln (ArqDados, '=====');
Writeln (ArqDados, 'Medidor de Umidade Speedy (v 1.1)');
Writeln (ArqDados, '=====');
Writeln (ArqDados, 'Universidade de São Paulo');
Writeln (ArqDados, 'Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz');
Writeln (ArqDados, 'Garzella,T.C; Botrel,T.A.');
```

```

Writeln (ArqDados, '=====');
Writeln (ArqDados, '');
Writeln (ArqDados, 'Data; Hora; N.Ordem; N_Ponto; Nome_Ponto;
U_atual(%);DTA(mm);DRA(mm);Uc(%); Lamina(mm)');
Closefile (ArqDados);
edtcaminho.text:='';
edtarquivo.text:='Dados';
Close;
end;

procedure TRegistro.btncancelarClick(Sender: TObject);
begin
Close;
end;

procedure TRegistro.FormCreate(Sender: TObject);
begin
edtarquivo.text:='dados';
end;

end.

```

O código fonte do quarto sistema, que utiliza os compiladores Delphi e Visual Basic, a rotina para o compilador PBasic, do Basic Step e o diagrama do circuito desenvolvido pode ser obtido por meio de solicitação ao email: tcgarzella@gmail.com