

**ALAN KARDEK RÊGO SEGUNDO**

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE TEOR DE ÁGUA DO  
SOLO E DE SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM  
MALHA FECHADA PARA USO EM IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola para obtenção do título de  
*Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R343d  
2010

Rêgo Segundo, Alan Kardek, 1985-

Desenvolvimento de sensor de teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para uso em irrigação / Alan Kardek Rêgo Segundo. – Viçosa, MG, 2010.

xiv, 65f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: José Helvecio Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 64-65.

1. Irrigação. 2. Solos - Umidade. 3. Microcontroladores.  
4. Instrumentos agrícolas. 5. Agricultura de precisão.  
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.587

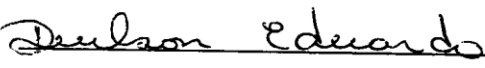
**ALAN KARDEK RÊGO SEGUNDO**


**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE TEOR DE ÁGUA DO SOLO E DE SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM MALHA FECHADA PARA USO EM IRRIGAÇÃO**

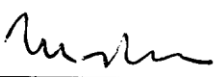
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

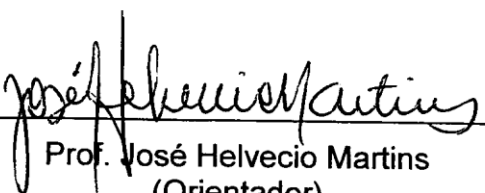
APROVADA: 22 de fevereiro de 2010

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Roberto Precci Lopes

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Denilson Eduardo Rodrigues

  
\_\_\_\_\_  
Prof. José Márcio Costa

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro  
(Co-orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. José Helvecio Martins  
(Orientador)

*A experiência nunca falha, apenas as nossas opiniões falham, ao esperar da experiência aquilo que ela não é capaz de oferecer.*

*“Leonardo da Vinci”*

A Deus,

## **AGRADEÇO**

Aos meus pais, irmãos e amigos,

## **DEDICO**

À comunidade Técnico-Científica,

## **OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais (Alan e Ilza) e irmãos (Clarissa e Juan), pelo apoio e amor incondicionais.

Aos professores Paulo Monteiro e José Helvecio, pela sincera amizade, orientação e disposição de sempre querer ajudar.

Ao professor José Márcio, pela amizade e orientação em projetos e no estágio de ensino.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade, apoio e estrutura concedidos para a realização do curso.

Aos professores do DEA e de outros departamentos, pela contribuição na minha formação acadêmica.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, André e Denílson, pela oportunidade e por me receberem tão bem quando trabalhei por lá.

Aos colegas de trabalho do IFMG-OP - Ronaldinho, Ricardo, Zé Eduardo, Sílvia, Adolfo, Édilus, Paulinho e Antônio - pela amizade, oportunidade e pelo aprendizado.

Aos colegas de pós-graduação, Cristiano e Keller, pela troca de informações e ajuda no decorrer do curso.

Ao colega Marcelo Rocha, que tanto ajudou na construção dos sensores.

Aos amigos e companheiros de república: Rafael Isaac (Tilt), Tiago, Caio (Japa), Vinícius, Rafael Scoralick (Montanha), Lucas (Lucão) e Alexandre.

Ao amigo Alex (Batera) e sua família: Seu Otacílio e Rosângela, por me receberem tão bem quando vou a Ouro Preto.

Aos amigos e amigas de tantas cidades que convivo. Obrigado!

## BIOGRAFIA

Alan Kardek Rêgo Segundo, filho de Alan Kardek Rêgo e Ilza Cardoso Rêgo, nasceu em Taiobeiras, Estado de Minas Gerais, em 14 de fevereiro de 1985.

Em janeiro de 2000, mudou-se para Montes Claros, para cursar o ensino médio.

Em 2003, iniciou o curso de Engenharia de Controle e Automação na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), graduando-se em 2008.

Neste mesmo ano, ingressou no programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa (UFV) como aluno não-vinculado.

Em 2009, iniciou como aluno de mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Energia na Agricultura, submetendo-se à defesa de dissertação para obtenção do título de *Magister Scientiae*, em 22 de fevereiro de 2010.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xiii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1. TEOR DE ÁGUA DO SOLO .....	5
2.1.1. Método Padrão de Estufa .....	8
2.1.2. Método de Bouyoucos .....	9
2.2. SISTEMAS ELETRÔNICOS DE INSTRUMENTAÇÃO .....	10
2.2.1. Componentes de um Sistema de Instrumentação.....	10
2.2.2. Alguns Conceitos em Instrumentação.....	11
2.2.3. Calibração .....	12
2.3. SENSORES CAPACITIVOS .....	12
2.3.1. Princípios de Funcionamento do Sensor Capacitivo .....	13
2.3.2. Capacitor não Ideal.....	17
2.3.3. Permissividade Elétrica Complexa.....	18
2.3.4. O Sensor Capacitivo de Teor de Água de Solo.....	19
2.4. CIRCUITOS ELETRÔNICOS DE MEDIDA E AMPLIFICADORES .....	20
2.4.1. Pontes de Medida .....	20
2.4.2. Amplificadores de Instrumentação .....	24
2.4.3. Circuito Oscilador.....	25
2.5. MICROCONTROLADORES .....	26
2.5.1. Interrupções.....	27
2.5.2. Portas .....	27
2.5.3. Comunicação Serial.....	28
2.5.4. Modulação por Largura de Pulso (PWM) .....	28
2.5.5. Conversor Analógico-Digital.....	29
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
3.1. DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE TEOR DE ÁGUA DO SOLO .....	30
3.1.1. Construção do Sensor .....	30
3.1.2. Circuito de Medição em Ponte de Corrente Alternada .....	32
3.1.3. Circuito de Medição Oscilador .....	32
3.1.4. Calibração dos Sensores.....	33
3.2. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.....	37
3.2.1. Circuito de Acionamento do Sistema de Irrigação.....	37
3.2.2. Programação dos Microcontroladores.....	38
3.2.3. Transmissão dos Dados .....	39
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
4.1. SENSORES .....	41
4.1.1. Hastes Revestidas por Verniz Isolante.....	41
4.1.2. Hastes Revestidas por Massa Epóxi.....	42
4.2. CIRCUITO DE MEDIÇÃO DOS SENSORES .....	44

4.2.1. Ponte em Corrente Alternada .....	44
4.2.2. Circuito Oscilador.....	45
4.3. CALIBRAÇÃO .....	45
4.3.1. Sensores com Hastes Recobertas por Verniz.....	45
4.3.2. Sensores com Hastes Recobertas com Massa Epóxi .....	49
4.4. PAINEL CONTROLADOR .....	54
4.5. REDE SEM FIO .....	60
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>62</b>
<b>6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>63</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Composição volumétrica do solo.	5
Figura 2.2	– Capacitância para placas finitas e paralelas.	16
Figura 2.3	– Ponte balanceada mostrando tensão zero, ou a mínima leitura, no medidor.	21
Figura 2.4	– Ponte de impedância em corrente alternada generalizada.	22
Figura 2.5	– Ponte simétrica para medir valores desconhecidos de indutância.	23
Figura 2.6	– Ponte simétrica para medir valores desconhecidos de capacitância.	24
Figura 2.7	– Ponte de Wien.	24
Figura 2.8	– Circuito de medida para sensores capacitivos com base no temporizador 555 em montagem astável.	25
Figura 2.9	– Microcontrolador PIC. Fonte: THE MICROCHIP..., 2008.	27
Figura 2.10	– Forma de onda de um sinal PWM.	29
Figura 2.11	– Conversor analógico-digital.	30
Figura 3.1	– Esquema de construção dos sensores de teor de água do solo.	32
Figura 3.2	– Circuito de medição utilizando ponte em corrente alternada.	33
Figura 3.3	– Circuito de medição utilizando oscilador.	34
Figura 3.4	– Procedimentos adotados na calibração dos sensores.	36
Figura 3.5	– Esquema da transmissão sem fio dos sinais de cada grupo de sensores até o painel de acionamento.	40
Figura 4.1	– Sensor de teor de água do solo com hastes revestidas por verniz isolante.	42
Figura 4.2	– Sensor de teor de água do solo com hastes revestidas com massa epóxi.	44
Figura 4.3	– Circuito de medição dos sensores.	45
Figura 4.4	– Variação do teor de água, em base seca, em função do sinal de tensão na saída do sensor.	48
Figura 4.5	– Teor de água do solo estimado ( $q$ ) em função do teor de água do solo observado ( $q_0$ ).	49

Figura 4.6	– Variação do teor de água, em peso, em função do sinal de saída do sensor (repetição 1).	52
Figura 4.7	– Variação do teor de água, em peso, em função do sinal de saída do sensor (repetição 2).	52
Figura 4.8	– Variação do teor de água, em peso, em função do sinal de saída do sensor (repetição 3).	53
Figura 4.9	– Sinal normalizado dos sensores recobertos por verniz (em vermelho) e por massa epóxi (em preto) em função do teor de água do solo.	54
Figura 4.10	– Sinal de saída do circuito oscilador em função da capacitância do sensor.	55
Figura 4.11	– Primeiro protótipo do painel controlador.	56
Figura 4.12	– Segundo protótipo do painel controlador.	57
Figura 4.13	– Ilustração do mostrador de cristal líquido.	58
Figura 4.14	– Detalhe dos botões e dos LEDs do painel controlador.	58
Figura 4.15	– Página 2: ajuste do relógio do painel controlador.	59
Figura 4.16	– Página 3: ajuste do tempo de funcionamento dos setores.	59
Figura 4.17	– Detalhe do tempo restante de funcionamento de cada setor.	59
Figura 4.18	– Página 4: ajuste da hora de iniciar a operação do sistema.	60
Figura 4.19	– Página 5: ajuste dos parâmetros limite superior e limite inferior.	60
Figura 4.20	– Página 6: configuração de horário de exclusão de funcionamento do sistema.	60
Figura 4.21	– Página 7: configuração dos dias de funcionamento do sistema.	61
Figura 4.22	– Módulos de transmissão de dados.	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	– Propriedades físico-hídricas e químicas do Neossolo Quartzarênico	35
Tabela 4.1	– Capacitância de cada sensor com hastes revestidas com verniz, imersos no ar e na água	42
Tabela 4.2	– Capacitância de cada sensor com hastes revestidas com massa epóxi, imersos no ar e na água, em função do material localizado entre as hastes (ar ou água)	44
Tabela 4.3	– Teor de água do solo, em peso, e sinal de saída do circuito de medição	47
Tabela 4.4	– Permissividade relativa de alguns constituintes do solo	50
Tabela 4.5	– Teor de água do solo, em peso, e sinal de saída do circuito de medição	51
Tabela 4.6	– Valores dos coeficientes A, B e C e do coeficiente de determinação, $R^2$ , obtidos para o modelo da Equação 4.2	55

## RESUMO

RÊGO SEGUNDO, Alan Kardek, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2010. **Desenvolvimento de sensor do teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para uso em irrigação.** Orientador: José Helvecio Martins. Co-orientadores: Paulo Marcos de Barros Monteiro, Rubens Alves de Oliveira e Delly Oliveira Filho.

Cada vez mais a água doce se torna escassa em todo o mundo e, diante desse problema, neste trabalho propõe-se desenvolver uma tecnologia visando utilizá-la de forma racional e inteligente em sistemas de irrigação. Tanto o excesso quanto a falta de água são fatores que afetam a produtividade das lavouras irrigadas e, conseqüentemente, o retorno econômico desse sistema de produção. Portanto, é interessante estabelecer um ponto ótimo entre a quantidade mínima de água aplicada e a máxima produtividade da cultura. Neste trabalho, foram desenvolvidos sensores do teor de água do solo, dois tipos de circuito de medição, um painel eletrônico gerenciador do acionamento do sistema de irrigação e uma rede sem fio para realizar a transmissão dos dados dos sensores até o painel. Portanto, o acionamento do sistema de irrigação será feito em malha fechada e em tempo real, de acordo com a avaliação do teor de água do solo. Os sensores foram construídos com três hastes paralelas de aço inoxidável, sustentados por resina de poliéster em sua parte superior. O seu princípio de funcionamento é baseado na capacitância de um capacitor, tendo como dielétrico o material de solo entre as hastes que formam os sensores. Assim, quando houver variação na constante dielétrica do solo localizado entre as hastes, devido à presença de água, a capacitância do sensor também irá variar. Dois tipos de revestimentos para isolar as hastes dos sensores foram testados: (i) verniz isolante do tipo usado em enrolamentos de motor e (ii) massa epóxi. Dois tipos de circuito de medição do sinal dos sensores foram avaliados: (i) ponte de corrente alternada e (ii) oscilador. Ambos os circuitos possuem um microcontrolador, que disponibiliza o seu sinal no formato digital para a rede sem fio. O painel de controle também foi baseado em um microcontrolador, além de botões, visor de cristal líquido e relés de estado sólido para o acionamento do conjunto moto-bomba e das válvulas direcionadoras do fluxo de água do sistema de irrigação. Na rede sem fio foi

utilizada topologia estrela. Deste modo, o painel comunica-se diretamente com cada sensor, que possui endereço fixo. No seu algoritmo, foi implementado um sistema mestre-escravo. Portanto, o painel (mestre) solicita o dado de determinado sensor (escravo) por meio do seu endereço. Em seguida, o sensor responde ao pedido com a medição do teor de água do solo. São realizadas três tentativas de pedido, retornando sinal de falha no caso em que todas elas fracassarem. Portanto, são armazenados, temporariamente, dois vetores na memória do microcontrolador do painel: (i) um vetor de dados dos sensores e (ii) um vetor indicando possível falha na transmissão. Desenvolveu-se também, neste algoritmo, a possibilidade de repetição do sinal. Neste caso, para os sensores mais distantes, o pedido e a resposta são retransmitidos pelo circuito de um sensor mais próximo do painel. Os dois tipos de sensores foram calibrados tomando-se como referência o método padrão de estufa. Foram colocadas três amostras de material de solo Neossolo Quartzarênico, de propriedades físico-químicas conhecidas, em três recipientes de volume conhecido. Essas amostras foram saturadas e, em seguida, um sensor foi inserido em cada amostra e foram medidos o seu sinal de saída no circuito eletrônico e a massa da amostra. Em seguida, as amostras foram colocadas em uma estufa para secagem. O mesmo procedimento foi realizado diariamente, até que a variação da quantidade de água nas amostras de solo se tornasse, praticamente, constante. No fim do experimento, obteve-se a massa de solo seco e, a partir deste dado, o teor de água do solo para cada medição. Por fim, ajustou-se um modelo matemático para estimar o teor de água do solo a partir da correlação entre os dados do método de referência (padrão de estufa) com os dados medidos pelo circuito eletrônico. No experimento utilizando sensores com hastes recobertas por verniz isolante, obteve-se um coeficiente de determinação de 93,17% e uma precisão nas medidas de  $\pm 0,010 \text{ kg kg}^{-1}$ . No experimento utilizando sensores com hastes recobertas por massa epóxi, não foi possível ajustar qualquer modelo matemático aos dados experimentais. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que o sensor com hastes recobertas por verniz isolante e seu circuito de medição podem ser utilizados na automação de sistemas de irrigação, juntamente com o painel controlador e a rede sem fio para transmissão de dados.

## ABSTRACT

RÊGO SEGUNDO, Alan Kardek, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2010. **Development of sensor of soil water content and a closed loop control and automation system for use in irrigation.** Adviser: José Helvecio Martins. Co-advisers: Paulo Marcos de Barros Monteiro, Rubens Alves de Oliveira and Delly Oliveira Filho.

Fresh water becomes increasingly scarce in the world, and for dealing with this problem, in this work it is proposed to develop a technology aiming to use it in a rational and intelligent way in irrigation systems. Both excess and deficit of water are factors that affect the productivity of irrigated crops and, consequently, the economic return of this production system. Therefore, it is interesting to establish an optimal point between the minimum amount of water applied and the maximum yield. In this work, there were developed sensors of soil water content, two types of measurement circuit, an electronic panel for controlling and management of the irrigation system, and a wireless network for transmission of data from the sensors to the panel. Therefore, the actuation on of the irrigation system (turn it on or off) will be done in closed loop, and in real-time, according to the evaluation of the soil water content. The sensors were constructed with three parallel stainless steel rods, supported by polyester resin at the top. Its working principle is based on the capacitance of a capacitor, with the dielectric been the soil material between the rods that form the sensors. Thus, when there is variation in the dielectric constant of the soil located between the rods, due to the presence of water, the capacitance of the sensor will also vary. Two types of coatings to insulate the sensors rods were tested: (i) insulating varnish of the type used in motor windings and (ii) epoxy paste. Two types of circuit for measuring the signal from the sensors were evaluated: (i) ac bridge and (ii) oscillator. Both circuits have a microcontroller, which provides its signal in digital format for the wireless network. The control panel was also based on a microcontroller, plus buttons, liquid crystal display, and solid state relays for actuation on the pump-motor set and on the valves that direct the flow of water of the irrigation system. The wireless network was configures using star topology. Thus, the panel communicates directly with each sensor, which has a fixed address. In his algorithm was implemented a master-slave system.

Therefore, the panel (master) requests the data of a given sensor (slave) through its address. Then, the sensor responds to the request with the measurement of the water content of soil. Three requests attempts are made, returning fault signal in case they all fail. So, two vectors are temporarily stored in the memory of the panel microcontroller: (i) a vector containing the sensor data and (ii) a vector indicating a possible failure of the transmission. It was also developed in this algorithm the possibility of repeating the signal. In this case, for more remote sensors the request and response are retransmitted by the circuit of a sensor closer to the panel. The two types of sensors were calibrated using the standard oven method as reference. Three samples of Neossolo Quartzarênico soil material of known physical and chemical properties were placed in three recipients of known volume. These samples were saturated and then a sensor was inserted in each sample and its output signal was measured in the electronic circuit, and the mass of the sample was also determined. Then the samples were placed in an oven for drying. The same procedure was performed daily until the variation of the amount of water in the soil samples became practically constant. At the end of the experiment the mass of dried soil was obtained, and from these data the water content of the soil was determined for each measurement. Finally, a mathematical model was fitted to estimate the soil water content from the correlation between the data of the reference method (standard oven method) with the data measured by the electronic circuit. In the experiment using sensors with the rods covered with insulating varnish, it was obtained a coefficient of determination of 93.17% and precision in the measures of  $\pm 0.010 \text{ kg kg}^{-1}$ . In the experiment using sensors with rods coated with epoxy paste, it was not possible to fit a mathematical model to the experimental data. Based on these results, it was concluded that the sensor with rods covered with insulating varnish and its measurement circuit can be used in the automation of irrigation systems, along with the controller panel and wireless network for data transmission.

# 1. INTRODUÇÃO

Em algumas regiões do Brasil, os recursos hídricos são escassos, requerendo estudos criteriosos para a orientação com relação ao uso mais eficiente da água. A irrigação é uma alternativa tecnológica para contornar a escassez hídrica das culturas, visando assegurar o aumento da produtividade e da qualidade dos produtos (GOMIDE, 2002).

A dificuldade do uso de manejo de irrigação decorre principalmente da habilidade, da experiência e do nível educacional do produtor (PAZ et al., 2000).

Uma solução para prevenir possíveis falhas e irregularidades do acionamento manual dos sistemas de irrigação é a utilização de circuitos eletrônicos para acionar o sistema em horário específico e durante tempo determinado, de acordo com a estratégia de manejo pré-programada.

Além disso, o uso da automação nos sistemas de irrigação proporciona decréscimo no diâmetro necessário às canalizações e na capacidade do sistema, pela possibilidade de maior fracionamento da área em operação (OLLITA, 1983). A área total a ser irrigada pode ser dividida em unidades menores ou setores, que são irrigados um de cada vez. O direcionamento da água de irrigação para cada setor pode ser feito por meio do acionamento de válvulas solenóides ou hidráulicas.

A determinação da quantidade de água necessária para a irrigação é um dos principais parâmetros para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de qualquer sistema de irrigação, bem como para a avaliação de disponibilidade de recursos hídricos. Quando a quantidade de água necessária for superestimada, têm-se como consequência sistemas de irrigação superdimensionados, aumentando o custo da irrigação por unidade de área (MANTOVANI et al., 2007).

A aplicação de água em excesso provoca, muitas vezes, a elevação do lençol freático, salinização do solo e lixiviação dos nutrientes. Por outro lado, quando a quantidade de água necessária for subestimada, tem-se o subdimensionamento do sistema de irrigação e, como consequência, obtém-se baixa produtividade ou, como é mais freqüente, incapacidade do sistema para

irrigar toda a área do projeto, ou seja, redução da área a ser irrigada (BERNARDO et al., 2006).

Na literatura, existem recomendações de frequências fixas de irrigação para cada cultura. Embora possa ser prático no sentido de programação das operações, esse método acarreta déficits e, ou, excessos de água, uma vez que as condições climáticas são variáveis durante o ano. Desse modo, existe a necessidade do uso de métodos de campo que determinem, direta ou indiretamente, a disponibilidade hídrica do solo para as culturas, de acordo com as condições ambientais predominantes durante o desenvolvimento das plantas (FARIA e COSTA, 1987).

O manejo da irrigação baseado no monitoramento do teor de água do solo permite racionalizar a quantidade de água aplicada, tornando o seu uso mais eficiente.

O conceito de uso eficiente da água inclui qualquer medida que reduza a quantidade que se utiliza por unidade de produção, e que favoreça a sua manutenção (PAZ et al., 2000). Desta maneira, pode-se desenvolver uma agricultura sustentável, assegurando que haja recursos suficientes para as gerações futuras.

A técnica da reflectometria no domínio do tempo aplicada para medição de teor de água do solo consiste em determinar o valor de sua constante dielétrica. O teor de água do solo é função da constante dielétrica. Este valor é baseado no tempo de emissão e, ou, reflexão de um pulso eletromagnético, emitido por um gerador de pulsos, em hastes metálicas paralelas que servem como “guias de ondas”. Neste caso, a constante dielétrica determinada será a do material entre as hastes metálicas, ou seja, a do solo (PEREIRA, 2001).

Considerando que o tempo de trânsito do pulso eletromagnético é muito pequeno, da ordem de  $10^{-9}$  s (1 ns), a técnica de quantificação deste tempo necessita ser sofisticada e precisa, exigindo, portanto, equipamento eletrônico complexo e, conseqüentemente, caro (LACERDA et al., 2005).

Sensores capacitivos podem ser usados para medir, de maneira indireta, o teor de água do solo. A variação da capacitância do solo ocorre devido à variação da sua constante dielétrica, que é correlacionada, principalmente, com a variação do seu teor de água. Portanto, trata-se da variação do mesmo

parâmetro de medição utilizado no método da reflectometria no domínio do tempo: constante dielétrica do solo. Entretanto, os dispositivos (*hardware*) utilizados para medir o sinal nos sensores capacitivos são mais simples e, conseqüentemente, mais baratos.

Quando o sistema for instalado em campo, os dados coletados em vários pontos podem ser enviados, por meio de rádio frequência, para um controlador. Este controlador foi desenvolvido para monitorar, em tempo real, o teor de água do solo da área de produção e para atuar no acionamento do sistema de irrigação. Portanto, o controle do sistema de irrigação é realizado em malha-fechada.

Um sistema de controle em malha fechada é aquele no qual o sinal de saída possui um efeito direto na ação de controle, o que implica no uso de ação de realimentação com a finalidade de reduzir o erro do sistema (OGATA, 1997).

Para o desenvolvimento deste controlador podem ser utilizados os microcontroladores programáveis, que utilizam arquitetura com conjunto reduzido de instruções de computador (*Reduced Instruction Set Computer – RISC*), com frequências de temporização da ordem de dezenas de mega hertz. Possuem memória de programa e memória de dados, separadamente. Além disso, podem ser encontrados com diversos periféricos internos, como: temporizadores ou contadores, memória programável e apagável eletronicamente (*Electrical Erasable PROgrammable Memory – EEPROM*) interna, gerador/comparador/amostrador por modulação de largura de pulso (*Pulse Width Modulation – PWM*), conversores analógico-digitais (A/D), interface de barramento para rede local controlada (*Controller Area Network - CAN*), entre circuitos integrados (*Inter Integrated Circuit – I2C*), interface serial de periféricos (*Serial Peripheral Interface - SPI*), dentre outros (PEREIRA, 2007).

O microcontrolador proporciona alta flexibilidade ao equipamento, pois permite customização para diferentes sistemas de irrigação, mediante simples alteração do seu programa computacional.

O programa do controlador permite que o manejo da irrigação seja realizado em função do tempo de funcionamento do sistema e, ou, de acordo

com a avaliação do teor de água do solo, conforme a estratégia de controle da irrigação predefinida.

Com essa implementação é possível irrigar durante a noite, a fim de melhorar a distribuição de água ao longo do dia, evitando picos de consumo. Obtém-se também aumento na eficiência do sistema de irrigação, visto que, à noite, as perdas de água por evaporação e transporte pelo vento são minimizadas. Além disso, durante a noite, a tarifa de energia elétrica no meio rural é menor.

A utilização deste tipo de tecnologia, juntamente com outras técnicas de agricultura de precisão, como aplicação de fertilizantes a taxa variável e sensoriamento remoto, podem contribuir para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, reduzindo os impactos ambientais.

Diante do exposto propõe-se:

- i. Desenvolver sensor para medir o teor de água do solo.
- ii. Desenvolver sistema de controle e automação para manejo de irrigação, utilizando-se microcontroladores, eletrônica de potência e transmissão de dados por meio de uma rede sem fio.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. TEOR DE ÁGUA DO SOLO

Existem vários métodos de medição do teor de água do solo usados em irrigação: gravimétricos, eletrométricos, dentre outros.

O solo é constituído de partículas sólidas, líquidas e gasosas. O volume de sólidos pode ser considerado praticamente fixo, enquanto os gases e a solução ocupam o espaço poroso do solo. Se a quantidade de solução ou o teor de água do solo aumentam, a quantidade de gases diminui. Na realidade, o solo pode ser considerado um grande reservatório, cuja quantidade de água armazenada varia com o teor de água.

De acordo com Bernardo et al. (2006), o teor de água do solo é definido como a razão entre a massa de água e a massa de solo seco, denominada teor de água em peso,  $U_p$ , ou como a razão entre o volume de água e o volume de solo, denominada teor de água em volume,  $U_v$ . Considerando o cubo de solo de aresta  $L$  da Figura 2.1, obtém-se o teor de água em volume,  $U_v$ , por meio da Equação 2.1.

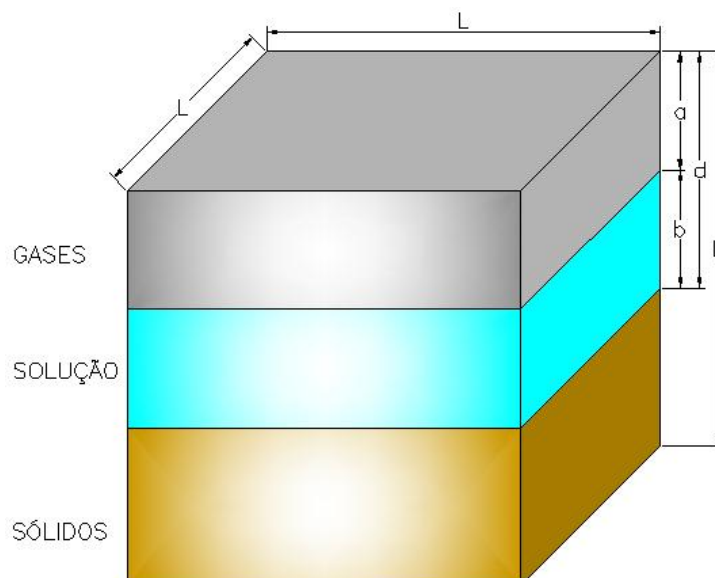


Figura 2.1 – Composição volumétrica do solo.

$$U_v = \frac{V_\ell}{V_s} = \frac{bL^2}{L^3} = \frac{b}{L} \quad (2.1)$$

em que:

- $U_v$  - teor de água do solo expresso em volume, adimensional.
- $V_\ell$  - volume de água contido no solo,  $m^3$ .
- $V_s$  - volume de solo,  $m^3$ .
- $b$  - lâmina de água retida em um cubo de solo de aresta  $L$ , m.
- $L$  - medida da aresta de um cubo de solo, m.

A vantagem de se trabalhar com o teor de água em volume é que o valor obtido corresponde à lâmina de água retida por camada de solo. Por exemplo, se o teor de água do solo, em volume, for 20%, significa que em cada centímetro de solo existem 2,0 mm de água.

Denomina-se massa específica do solo,  $\rho_s$ , a relação entre a massa e o volume de uma amostra de solo seco, conforme a Equação 2.2.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2.2)$$

em que:

- $\rho_s$  - massa específica do solo,  $kg\ m^{-3}$ .
- $m_s$  - massa de solo seco, kg.
- $V_s$  - volume de solo seco,  $m^3$ .

De forma semelhante, a razão entre a massa de solo seco e o volume das partículas sólidas é denominada massa específica das partículas sólidas do solo,  $\rho_{ps}$  (Equação 2.3).

$$\rho_{ps} = \frac{m_s}{V_{ps}} \quad (2.3)$$

em que:

- $\rho_{ps}$  - massa específica das partículas sólidas do solo,  $kg\ m^{-3}$ .
- $V_{ps}$  - volume das partículas sólidas de solo,  $m^3$ .

A densidade de uma substância é definida como sendo a relação entre a massa específica da substância e a massa específica de uma substância tomada como referência, normalmente a água.

A massa específica da água pode ser assumida como sendo igual a  $1.000 \text{ kg m}^{-3}$  ( $1,000 \text{ g cm}^{-3}$ ). Neste caso, tem-se a densidade aparente do solo,  $d_{as}$ , numericamente igual à massa aparente específica do solo,  $\rho_{as}$ , dada em  $\text{g cm}^{-3}$ . De modo semelhante, a densidade das partículas sólidas do solo,  $d_{ps}$ , também denominada densidade real do solo, é numericamente igual à massa específica das partículas do solo,  $\rho_{ps}$ . Geralmente, a densidade das partículas dos solos é considerada igual a 2,65, aproximadamente (BERNARDO et al., 2006).

Outro parâmetro importante do solo é a porosidade,  $p$ , definida como a razão entre o volume de poros (volume de solução mais o volume de gases) e o volume do solo. De acordo com a Figura 2.1, pode-se expressar a porosidade por meio das Equações 2.4 e 2.5.

$$p = \frac{V_p}{V_s} = \frac{d L^2}{L^3} = \frac{d}{L} \quad (2.4)$$

$$p = 1 - \frac{d_{as}}{d_{ps}} \quad (2.5)$$

em que:

- $p$  - porosidade do solo, adimensional.
- $V_p$  - volume de poros,  $\text{m}^{-3}$ .
- $d_{as}$  - densidade aparente do solo, adimensional.
- $d_{ps}$  - densidade das partículas sólidas de solo, adimensional.
- $d$  - parcela de água e de gases contida em um cubo de solo de aresta  $L$ , m.

Também importante é a razão de saturação de um solo,  $S$ , definida como sendo a relação entre o volume da solução e o volume total de poros. Pode-se expressá-la por meio da Equação 2.6, conforme ilustrado na

Figura 2.1. Quando o volume de poros está totalmente cheio de solução, diz-se que o solo está saturado, e a razão de saturação é igual a 100%.

$$S = \frac{V_{\text{sol}}}{V_p} = \frac{b L^2}{d L^2} = \frac{b}{d} \quad (2.6)$$

em que:

- S - razão de saturação do solo, adimensional.
- $V_{\text{sol}}$  - volume de solução contida no solo,  $\text{m}^3$ .
- $V_p$  - volume de poros do solo,  $\text{m}^{-3}$ .
- d - parcela de água e de gases contida em um cubo de solo de aresta L, m.

Dividindo-se o teor de água em volume pela densidade do solo, obtém-se o teor de água em peso,  $U_p$ .

$$U_p = \frac{U_v}{d_s} \quad (2.7)$$

O teor de água do solo influencia diretamente o volume de água nele armazenado, bem como a sua resistência e a compactação, dentre outros fatores. Portanto, é essencial o conhecimento do teor de água do solo para estudos do movimento da água no solo, disponibilidade de água, erosão e quantidade de água a ser aplicada em irrigação e muitos outros problemas (BERNARDO et al., 2006).

Alguns dos métodos para determinar o teor de água do solo são descritos por Bernardo et al. (2006) e apresentados a seguir, nos sub-itens 2.1.1 e 2.1.2.

### 2.1.1. Método Padrão de Estufa

É um método gravimétrico direto bastante preciso que consiste em retirar amostras do solo na área e na profundidade em que se deseja saber o teor de água, colocá-las em um recipiente fechado, geralmente de alumínio, e trazê-las para o laboratório. Pesa-se o recipiente com a amostra de solo úmido, obtendo-se a massa  $m_1$ , e coloca-se o recipiente, aberto, em uma estufa com

temperatura mantida entre 105 e 110 °C. Depois de 24 horas, no mínimo, retira-se o recipiente com o solo seco da estufa, pesando-o novamente, obtendo-se a massa  $m_2$ . Sendo  $m_3$  a massa do recipiente, a percentagem de teor de água em peso (ou em massa) será dada pela Equação 2.8.

$$U_p = \frac{m_\ell}{m_s} = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_3} \right) 100 \quad (2.8)$$

Para determinação direta do teor de água em volume, é necessário saber qual o volume da amostra que foi retirada do solo, ou pode-se determiná-la indiretamente, conhecendo-se a densidade aparente do solo,  $d_{as}$ , respectivamente, utilizando as Equações 2.9 e 2.10.

$$U_v = \left( \frac{m_1 - m_2}{V_a} \right) 100 \quad (2.9)$$

$$U_v = 100 \left( \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_3} \right) d_{as} = U_p d_{as} \quad (2.10)$$

em que:

$V_a$  - volume da amostra,  $m^3$ .

Apesar de este método ser o mais preciso, apresenta o inconveniente, para irrigação, de só permitir o conhecimento do teor de água do solo 24 horas depois da amostragem, além de exigir balança e estufa.

### 2.1.2. Método de Bouyoucos

É um método eletrométrico baseado na resistência elétrica entre dois eletrodos inseridos em um bloco, em geral, de gesso. A resistência elétrica é medida por meio da medição do valor eficaz de corrente alternada, o qual é calibrado para leituras diretas do teor de água do solo.

Os blocos de gesso, quando enterrados no solo, absorvem água, ou a perdem para o solo, até que a solução dentro deles atinja o equilíbrio com a água do solo, variando de acordo com o teor de água deste. A resistência elétrica entre os eletrodos de cada bloco varia conforme seu teor de água. A

resistência elétrica do bloco será baixa, quando ele estiver mais úmido, e alta quando estiver mais seco. Dessa maneira, o teor de água do solo pode ser determinado indiretamente, por meio da medição da resistência elétrica nos blocos que se encontram enterrados no solo.

Assim, como os medidores de Bouyoucos são calibrados, em se tratando de água disponível, quando se lê 0 % no medidor, significa que não há água disponível no solo para as plantas, ou seja, o teor de água do solo está próximo ao valor correspondente ao ponto de murchamento. Quando se lê 100 %, quer dizer que o teor de água está próximo da capacidade de campo.

Cada bloco deve ser instalado na profundidade de máxima intensidade radicular da cultura cuja irrigação se deseja controlar, em função da variação do teor de água do solo.

Este método, na maioria das vezes, é utilizado para ler a porcentagem de água útil dos solos. No entanto, como a sua calibração é geral para todos os tipos de solos e ele omite o efeito da temperatura, sua precisão é baixa. É de simples e fácil manejo. Pode, satisfatoriamente, ser usado para controle de irrigação, mas, para usá-lo em pesquisas com teores de água no solo, deve-se desprezar a sua calibração geral em porcentagem de água disponível e calibrá-lo em função da porcentagem de teor de água para cada solo.

## **2.2. SISTEMAS ELETRÔNICOS DE INSTRUMENTAÇÃO**

### **2.2.1. Componentes de um Sistema de Instrumentação**

Um sistema eletrônico de instrumentação é formado, basicamente, pelos seguintes subsistemas (DALLY et al., 1993):

- **Transdutor:** é um dispositivo que transforma a variação de uma grandeza física (mecânica, térmica, dentre outras) em variação de sinal elétrico, que possa ser monitorada como tensão depois do seu condicionamento.
- **Fonte de energia:** fornece energia, em corrente alternada ou em corrente contínua, para satisfazer às condições do transdutor que está sendo empregado.

- **Amplificadores:** são circuitos eletrônicos que convertem, compensam ou manipulam o sinal de saída do transdutor em uma quantidade elétrica mais usual.
- **Mostradores e registradores:** são dispositivos usados para mostrar e registrar a medida de interesse de forma que possa ser lida e interpretada, como, por exemplo, mostradores de cristal líquido e memórias.
- **Processadores de dados:** são usados com sistemas de instrumentos que incorporam a conversão analógico-digital (A/D) e fornecem o sinal de saída representando a medida em um código digital. Eles são, geralmente, microprocessadores que aceitam a entrada digital e realizam as operações computacionais de acordo com sua programação. O sinal de saída é mostrado em gráficos ou tabelas que ilustram o resultado do sistema estudado.
- **Controladores de processo:** são usados para monitorar e ajustar qualquer quantidade que deva ser mantida em um valor específico para produzir um material ou produto em um processo controlado. O sinal do sistema de instrumentação é comparado com um sinal de referência e, de acordo com a diferença entre eles, é gerado um sinal de erro. O sinal de erro é então usado para ajustar, automaticamente, o processo.

### 2.2.2. Alguns Conceitos em Instrumentação

Definem-se (BOLTON, 2002), a seguir, alguns dos principais conceitos em instrumentação:

- **Exatidão:** é o quanto as leituras fornecidas pelo sistema se aproximam dos valores reais.
- **Repetibilidade:** expressa a capacidade de um sistema indicar a mesma saída para uma série de aplicações do mesmo sinal de entrada, sendo os intervalos de tempo, entre as aplicações, relativamente pequenos.
- **Estabilidade:** expressa a capacidade de um sistema indicar a mesma saída para uma série de aplicações do mesmo sinal de entrada, quando os intervalos de tempo entre as aplicações forem longos.

- **Constância:** descreve a capacidade de um sistema em manter uma leitura constante em resposta a um impulso constante.
- **Reprodutibilidade:** descreve a capacidade de um sistema em indicar uma leitura para uma dada entrada, quando tal entrada for ou constantemente aplicada ao sistema ou a ele apresentada numa série de ocasiões. Os termos repetibilidade, estabilidade e constância são apenas formas de expressar a reprodutibilidade de um sistema sob diferentes condições de entrada.
- **Precisão:** qualidade da medição que representa a dispersão dos vários resultados, correspondentes a medições realizadas nas repetições, em torno do valor central. É usualmente associado ao erro padrão.
- **Sensibilidade:** é definida pela razão entre a variação do sinal de saída e a variação do sinal que provocou esse efeito, ou seja, o sinal de entrada.
- **Ganho:** é definido pela razão entre o sinal de saída e o sinal de entrada.

### 2.2.3. Calibração

Calibração é o processo de verificação de um sistema de medição em relação a um padrão tomado como referência (BOLTON, 2002). A comparação pode ser feita como apresentado a seguir:

- Com um padrão primário.
- Com um padrão secundário que tenha precisão maior que a do sistema que está sendo calibrado.
- Com uma fonte de entrada conhecida, a qual envolve outras medidas que podem ser feitas com maior precisão que a do sistema sendo calibrado.

## 2.3. SENSORES CAPACITIVOS

Os sensores capacitivos são baseados na variação da capacitância entre dois ou mais condutores separados por um meio dielétrico, em resposta à variação de alguma propriedade física. Embora as aplicações mais conhecidas estejam associadas com a medida de movimento linear e angular, os sensores

capacitivos são empregados também para medir teor de água, pressão, nível, aceleração, dentre outros. As suas principais características são (GARCÍA et al., 2004):

- Permitem detectar pequenos deslocamentos, da ordem de  $10^{-10}$  mm.
- São facilmente integrados em um micro-circuito eletrônico (*chip*) de silício.
- São estáveis em ambientes hostis.
- Apresentam baixo consumo de energia.

### 2.3.1. Princípios de Funcionamento do Sensor Capacitivo

O fenômeno da capacitância elétrica é utilizado numa grande variedade de sensores devido a algumas características convenientes que ele apresenta. Basicamente, dois princípios podem ser utilizados para caracterizar uma determinada grandeza variante no tempo (EDMINISTER, 1985):

- O primeiro princípio é baseado na variação da distância entre as placas de um capacitor.
- O segundo princípio utiliza a variação do meio dielétrico existente no interior das placas do capacitor.

Para que o efeito capacitivo seja entendido como princípio de funcionamento de sensores, é necessário, inicialmente, que se caracterize precisamente o que é capacitância.

A definição mais abrangente de capacitância entre dois condutores quaisquer, imersos em um meio dielétrico homogêneo, é dada pela Equação 2.11 (HAYT Jr., 1983).

$$C = \frac{Q}{V_0} \quad (2.11)$$

em que:

- C - capacitância entre dois condutores quaisquer, F.
- Q - módulo da carga elétrica total de cada condutor, C.
- $V_0$  - diferença de potencial elétrico entre os condutores, V.

Porém, a Equação 2.11 nada diz a respeito do meio dielétrico ou da distância entre os condutores. Para que seja possível resolver esta questão, deve-se usar como recurso a Lei de Gauss. Partindo da aplicação da Lei de Gauss ao elemento diferencial de volume do condutor, pode-se escrever a Equação 2.12.

$$Q = \oint_{\text{Js}} \vec{D} \, d\vec{A} \quad (2.12)$$

em que:

$\vec{D}$  - densidade de fluxo elétrico,  $C \, m^{-2}$ .

$d\vec{A}$  - elemento diferencial de área da superfície do condutor,  $m^2$ .

Para deduzir a expressão do capacitor de placas planas e paralelas, é necessário expressar a densidade de fluxo elétrico em função da intensidade de campo elétrico e da permissividade elétrica do meio. Assim, no vácuo, a densidade de fluxo elétrico pode ser expressa pela Equação 2.13.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.13)$$

em que:

$\epsilon_0$  - permissividade elétrica do vácuo,  $C^2 \, N^{-1} \, m^{-2}$ .

$\vec{E}$  - vetor campo elétrico,  $N \, C^{-1}$ .

Considerando qualquer outro meio dielétrico diferente do vácuo, define-se a permissividade elétrica (ou constante dielétrica) de acordo com a Equação (2.14).

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.14)$$

em que:

$\epsilon$  - permissividade elétrica do meio,  $C^2 \, N^{-1} \, m^{-2}$ .

$\epsilon_r$  - permissividade elétrica relativa, adimensional.

A permissividade relativa  $\epsilon_r$  é uma característica intrínseca do material dielétrico utilizado no capacitor.

A partir da lei de Coulomb, entende-se que a permissividade elétrica está associada com o nível de interferência causado pelo meio dielétrico nas forças de interação entre as cargas, sendo o vácuo o meio mais facilitador.

Partindo-se da definição de diferença de potencial elétrico entre um ponto A e um ponto B, tem-se a Equação 2.15.

$$V_{AB} = - \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad (2.15)$$

Aplicando-se os resultados obtidos nas Equações 2.13, 2.14 e 2.15 na Equação 2.11, obtém-se a Equação 2.16.

$$C = \frac{\oint_{\text{gs}} \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{A}}{- \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{L}} \quad (2.16)$$

Analisando a Equação 2.16, conclui-se que a capacitância pode ser determinada indiretamente, isto é, sem a necessidade de conhecer a diferença de potencial aplicada e a carga elétrica presente em qualquer um dos condutores. Estas duas características resumem a utilidade do capacitor em circuitos elétricos. Considerando-se um sistema particular mais simples, no qual os condutores são planos infinitos e paralelos, conforme apresentado na Figura 2.2, obtém-se a Equação 2.17 (BORIM e PINTO, 2006).

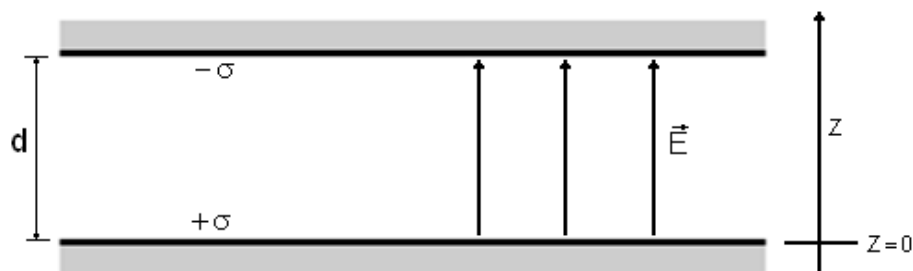


Figura 2.2 – Capacitância para placas finitas e paralelas.

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon} \vec{a}_z \quad (2.17)$$

em que:

- $\sigma$  - densidade superficial de cargas,  $C m^{-2}$ .
- $\vec{a}_z$  - versor do eixo da coordenada z.

Partindo da Equação 2.17 e utilizando a Equação 2.13, obtém-se a Equação 2.18.

$$\vec{D} = \sigma \vec{a}_z \quad (2.18)$$

A diferença de potencial entre as placas,  $V_0$ , obtém-se a partir da Equação 2.19.

$$V_0 = \int \vec{E} \cdot d\vec{L} = \int_d^0 \left( \frac{\sigma}{\epsilon} \right) dz \quad (2.19)$$

Integrando-se a Equação 2.19 obtém-se a Equação 2.20.

$$V_0 = \frac{\sigma}{\epsilon} d \quad (2.20)$$

em que:

- $V_0$  - diferença de potencial entre as placas do capacitor, V .
- $d$  - distância entre as placas do capacitor, m.

Como as placas utilizadas na dedução são consideradas infinitas, a carga elétrica presente em cada uma também é infinita, resultando em um valor infinito para a capacitância. Visando obter um resultado mais prático, deve-se considerar determinada região com área finita nas placas utilizadas. Desta forma, a carga presente,  $Q$ , não é mais infinita e pode ser expressa conforme a Equação 2.21.

$$Q = \sigma A \quad (2.21)$$

em que:

- $Q$  - quantidade de carga presente nas placas do capacitor, C .
- $A$  - área da placa utilizada no capacitor,  $m^2$  .

Substituindo as Equações 2.20 e 2.21 na Equação 2.11, obtém-se a Equação 2.22.

$$C = \varepsilon \left( \frac{A}{d} \right) \quad (2.22)$$

A Equação 2.22 é válida, com precisão satisfatória, para capacitores reais, desde que as dimensões da placa sejam consideravelmente maiores que a distância entre elas (KERCHNER e CORCORAN, 1973). Neste caso, a suposição de que as placas são infinitas comparadas com a distância entre elas, é válida.

A Equação 2.22 também mostra que quanto maior a permissividade elétrica do material dielétrico utilizado entre as placas do capacitor, maior sua capacidade de armazenamento de cargas, ou seja, maior sua capacitância. Analisando-se a Equação 2.11, quanto maior a capacitância, menor a tensão necessária para armazenar a mesma quantidade de carga nas placas do capacitor. Portanto, a permissividade elétrica também pode ser associada à capacidade de um capacitor armazenar carga quando submetido a um campo elétrico.

Analisando mais detalhadamente a Equação 2.22, observa-se que o valor da capacitância depende exclusivamente de características do meio dielétrico e da geometria do capacitor. Desta forma, é bastante viável utilizar a capacitância elétrica como princípio de funcionamento para sensores. Neste caso, tanto a variação da constante dielétrica,  $\varepsilon$ , como a variação da distância,  $d$ , podem ser utilizados para acompanhar a variação de outras grandezas (BORIM e PINTO, 2006).

### **2.3.2. Capacitor não Ideal**

Em um capacitor ideal, diz-se que o material dielétrico localizado entre suas placas é isolante. No entanto, não existe isolante perfeito, visto que, por mais alta que seja sua resistência à passagem de carga, seu valor é finito.

Portanto, em um capacitor real, existe uma corrente muito pequena que atravessa seu material dielétrico, denominada corrente de escoamento. Deste modo, pode-se modelar seu circuito equivalente como sendo um capacitor ideal em paralelo com um resistor (SALMAZO et al., 2006).

Pode-se concluir que, em um material dielétrico, ocorrem dois fenômenos simultaneamente: indução e condução.

A presença de impurezas na rede cristalina de um material dielétrico pode desequilibrar sua condição de valência ideal, resultando em um movimento aleatório de cargas. Esse movimento ocorre em função da temperatura, e deixa de ser aleatório quando essas cargas estão submetidas a um campo elétrico orientado. Surge então um caminho de escoamento para a corrente, diminuindo a resistência do material.

Quanto menor a resistência de isolamento do material dielétrico, maior sua capacitância e todo material dielétrico possui resistência inversamente proporcional à temperatura (SALMAZO et al., 2006).

### 2.3.3. Permissividade Elétrica Complexa

Pode-se expressar a permissividade elétrica dos materiais na forma complexa, de acordo com a Equação 2.23.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.23)$$

em que:

- $\varepsilon'$  - parte real da permissividade,  $F m^{-1}$ .
- $\varepsilon''$  - parte imaginária da permissividade,  $F m^{-1}$ .

A parte real da permissividade representa a medida da polaridade dos materiais constituintes do meio dielétrico. Já a parte imaginária representa a absorção de energia pela condução dos íons e pelas perdas dielétricas (SILVA, 2005).

A parte imaginária da permissividade elétrica pode ser representada pela Equação 2.24.

$$\varepsilon'' = j \frac{\sigma}{\omega} \quad (2.24)$$

em que:

- $\sigma$  - condutividade,  $S m^{-1}$ .
- $\omega$  - frequência angular,  $rad s^{-1}$ .

A parte imaginária da permissividade elétrica também depende da frequência de oscilação do campo elétrico aplicado. Esse fenômeno está associado à corrente de escoamento e à polarização dos íons do material dielétrico. Quanto menor a frequência, maior a condução e a frequência de oscilação dos íons e, portanto, maior a permissividade elétrica. Contudo, para minimizar esses efeitos, a frequência aplicada deve ser maior que a frequência de oscilação dos íons (SALMAZO et al., 2006).

A presença de sais influencia diretamente o comportamento da constante dielétrica para frequências menores que 30 MHz (SILVA, 2005).

#### **2.3.4. O Sensor Capacitivo de Teor de Água de Solo**

O sensor utilizado para monitorar o teor de água no solo trabalha com base na variação da sua capacitância elétrica, de acordo com a variação da quantidade de água presente no substrato analisado.

Como foi descrito na seção 2.3.1, existem dois parâmetros básicos para utilizar a capacitância elétrica em sensores. No primeiro procedimento, a distância entre as placas do capacitor deve ser variada. Porém, para esta aplicação, a utilização da distância variável é inadequada. Neste caso, o mais conveniente é utilizar a variação do meio dielétrico presente entre as placas do capacitor (BORIM e PINTO, 2006).

Assim, utilizando-se um capacitor não lacrado, dotado de um meio dielétrico poroso, a variação da capacitância depende exclusivamente do tipo e da quantidade de matéria presente entre as placas, uma vez que os demais parâmetros que influenciam no valor da capacitância podem ser considerados constantes para este caso. Desta forma, à medida que o solo ao redor do sensor se torna mais úmido, o meio poroso que compõe o dielétrico absorve uma determinada quantidade de água, proporcional ao teor de água presente no substrato. Analogamente, quando o solo se torna mais seco, o meio dielétrico perde água em função da quantidade de água presente ao redor do sensor. Este comportamento se deve ao fenômeno de difusão da água através de meios porosos.

Sabe-se que o teor de água na maioria dos tipos de solo pode ser variável de acordo com a profundidade considerada. Assim, a posição em que

o sensor é colocado depende da cultura que está sendo analisada, uma vez que cada planta desenvolve a maior parte das suas raízes em profundidade específica. O sensor deve ser colocado na zona da raiz da planta analisada, para que ele apresente uma resposta significativa da quantidade de água disponível para a planta (BORIM e PINTO, 2006).

Voltando à Equação 2.22, pode-se concluir que o valor da capacitância do sensor varia linearmente com a permissividade elétrica do meio, uma vez que tanto a distância entre as placas como a área delas são mantidas constantes. Desta forma, a resposta elétrica do sensor depende exclusivamente das variações ocorridas no meio dielétrico.

## **2.4. CIRCUITOS ELETRÔNICOS DE MEDIDA E AMPLIFICADORES**

Para realizar um bom condicionamento dos sinais obtidos de um sensor capacitivo, podem ser utilizadas pontes de corrente alternada e circuitos amplificadores de instrumentação, como descrito a seguir.

### **2.4.1. Pontes de Medida**

Nesta seção estão apresentados alguns dos principais conceitos sobre pontes de medida (KUPHALDT, 2007).

Em circuitos de medição em corrente contínua, a configuração do circuito conhecida como ponte, pode ser uma maneira muito útil de medir valores desconhecidos de resistência. Isto também é verdade em corrente alternada e pode-se aplicar o mesmo princípio para a medição precisa de impedâncias desconhecidas. O circuito em ponte funciona como um par de divisores de tensão de dois componentes conectados por meio de uma mesma fonte de tensão, com um mecanismo de medida de detecção de zero conectado entre eles para indicar a condição de balanceamento a uma tensão nula (Figura 2.3).

Qualquer um dos quatro resistores da Figura 2.3 pode ser o resistor de valor desconhecido e este valor pode ser determinado pela relação dos outros três, que são ajustados, ou que as suas resistências sejam conhecidas com um

grau de precisão satisfatório. Quando a ponte está na condição balanceada (tensão zero indicada pelo detector de zero), tem-se a Equação 2.25.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.25)$$

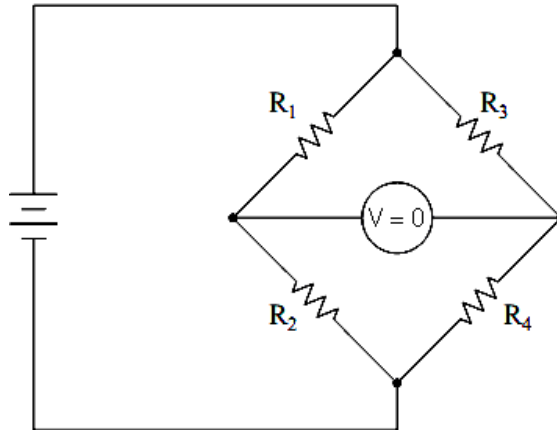


Figura 2.3 – Ponte balanceada mostrando tensão zero, ou a mínima leitura, no medidor.

Uma das vantagens de se usar o circuito em ponte para medir resistência é que a tensão da fonte é irrelevante. Praticamente, quanto maior o suprimento de tensão, mais fácil é detectar a condição de desequilíbrio entre os quatro resistores com o detector de zero, tornando a ponte mais sensível. Então, com um suprimento de tensão maior há a possibilidade de aumentar a precisão da medida. No entanto, não haverá erro fundamental introduzido como resultado de uma menor ou maior fonte de suprimento de tensão, diferentemente de outros tipos de circuito de medição de resistência.

Pontes de impedância funcionam da mesma forma, apenas a equação de balanceamento é constituída de elementos matemáticos complexos. Todavia, neste caso, a magnitude dos componentes e o ângulo de fase dos dois divisores de tensão devem ser iguais para o detector de zero indicar um valor nulo. O detector de zero deve ser um dispositivo capaz de medir tensões em corrente alternada muito pequenas. Um osciloscópio pode ser usado para isso, embora mecanismos medidores eletromecânicos muito sensíveis e mesmo fones de ouvido possam ser usados se a frequência estiver dentro da faixa de áudio.

Quando se descreve as pontes em corrente alternada, em que impedâncias e não somente resistências devem estar numa relação apropriada para balanço, algumas vezes é útil desenhar os respectivos ramos da ponte num modelo de componentes em forma de caixa, cada um com certa impedância (Figura 2.4).

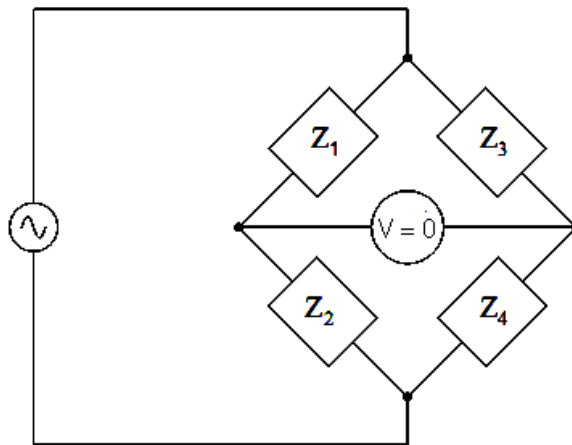


Figura 2.4 – Ponte de impedância em corrente alternada generalizada.

Para este modelo geral de ponte em corrente alternada balanceada, as relações de impedância de cada ramo devem estar de acordo com a Equação 2.26.

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (2.26)$$

Deve ser enfatizado que as impedâncias ( $Z_n$ ) da Equação 2.26 devem ser grandezas complexas, considerando-se a sua magnitude e ângulo de fase. Não é suficiente que somente as magnitudes da impedância sejam balanceadas. Se os ângulos de fase também não estiverem balanceados, ainda haverá tensão entre os terminais do detector de zero e a ponte não estará balanceada.

Circuitos em ponte podem ser construídos para medir capacitância, indutância e resistência. Em circuitos de medida em ponte, a quantidade desconhecida é sempre balanceada contra um padrão conhecido, fornecido por

um componente calibrado de alta qualidade, que possa ser ajustado até que o dispositivo detector de zero indique a condição de balanceamento.

Dependendo de como a ponte é configurada, o valor do componente desconhecido pode ser determinado diretamente pelo ajuste do componente padrão ou derivado do valor dele, por meio de fórmula matemática. Dois circuitos simples em ponte são mostrados nas Figuras 2.5 e 2.6 (KUPHALDT, 2007).

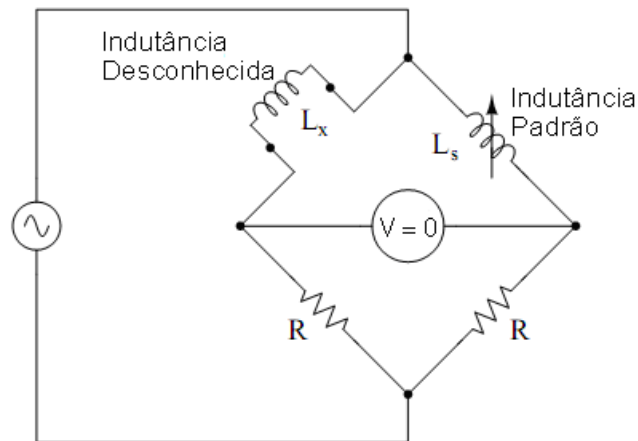


Figura 2.5 – Ponte simétrica para medir valores desconhecidos de indutância.

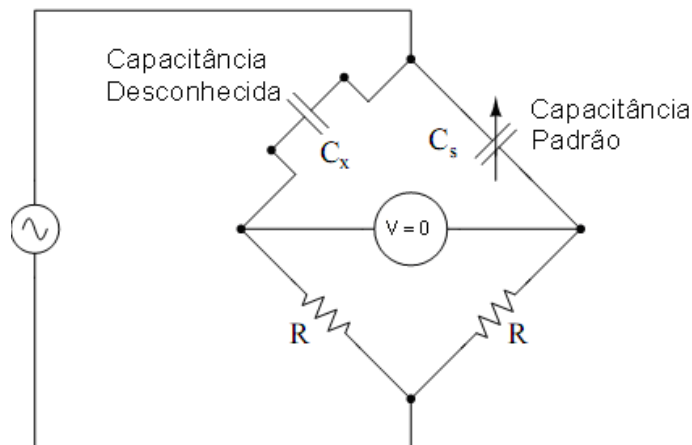


Figura 2.6 – Ponte simétrica para medir valores desconhecidos de capacitância.

As Figuras 2.5 e 2.6 mostram uma forma simplificada do modelo real. Na prática, acrescenta-se um resistor variável em série ou em paralelo como o componente reativo para balancear com a resistência existente no componente desconhecido.

Um exemplo de uma pequena complexidade extra adicionada para compensar os efeitos do mundo real pode ser encontrado na ponte de Wien (KUPHALDT, 2007). Essa ponte usa um resistor variável em paralelo com o capacitor variável padrão para balancear com o valor de impedância desconhecido, representado por um valor de resistência e capacitância em série (Figura 2.7).

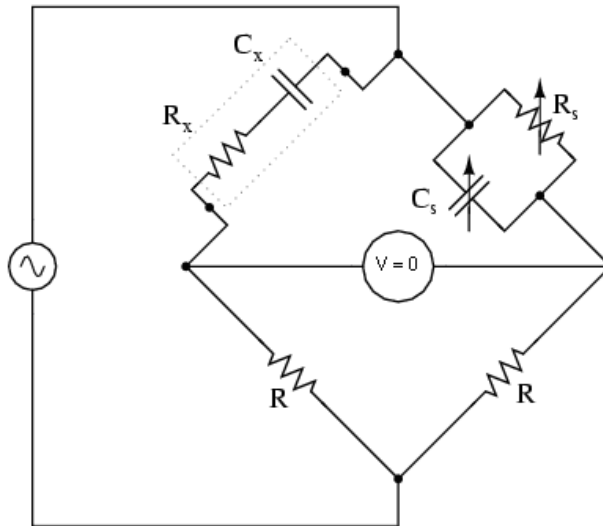


Figura 2.7 – Ponte de Wien.

Todo capacitor tem alguma resistência interna (em forma de perda pelo aquecimento do dielétrico) que tende a danificar de qualquer forma a sua perfeita natureza reativa.

#### 2.4.2. Amplificadores de Instrumentação

É um amplificador diferencial de tensão com alta precisão, com um circuito adequado para trabalhar em ambientes hostis, caracterizados por grandes flutuações de temperatura e intenso ruído elétrico. Além disso, estes amplificadores especiais devem ser capazes de trabalhar com sensores de resistência interna elevada e não simétrica, nos quais o ruído elétrico tem grande influência e, também, produzem sinais elétricos muito baixos (GARCÍA et al., 2004).

### 2.4.3. Circuito Oscilador

Outra maneira de desenvolver um circuito de medição para sensores capacitivos é por meio do circuito integrado temporizador 555 em sua configuração astável (Figura 2.8). Neste modo de operação, a frequência da tensão de saída é determinada pelo valor da capacitância do sensor (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2004).

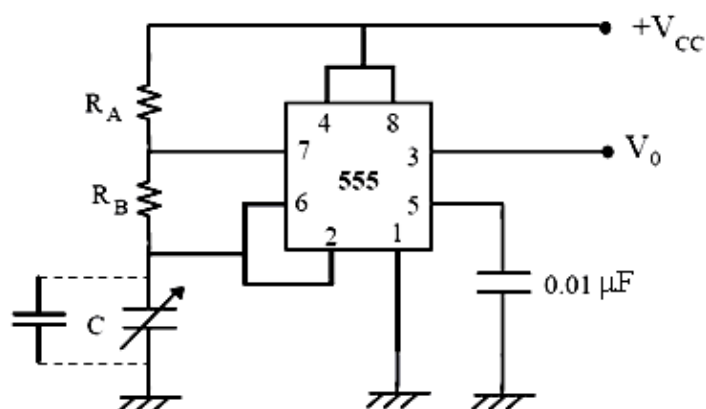


Figura 2.8 - Circuito de medida para sensores capacitivos com base no temporizador 555 em montagem astável.

Na Figura 2.8, C representa a capacitância do sensor ou a capacitância equivalente do sensor com um capacitor adicionado em paralelo. A frequência de oscilação do sinal de saída,  $V_0$ , é dada pela Equação 2.27.

$$F_{osc} \cong \frac{1,44}{R_A + 2 R_B C} \quad (2.27)$$

em que:

- $F_{osc}$  - frequência de oscilação do sinal de saída, Hz .
- $R_A$  - resistência do resistor A,  $\Omega$  .
- $R_B$  - resistência do resistor B,  $\Omega$  .
- C - capacitância do transdutor, F .

O ciclo de trabalho (*duty cycle*),  $c_t$ , em percentagem, do sinal de saída é dado pela Equação 2.28.

$$c_t = 100 \left( \frac{R_A + R_B}{R_A + 2 R_B} \right) \quad (2.28)$$

## 2.5. MICROCONTROLADORES

O microcontrolador pode ser definido como um “pequeno” componente eletrônico, dotado de uma “inteligência” programável, utilizado no controle de processos lógicos (Figura 2.9). Para entender melhor esta definição, ele será analisado por partes a seguir (SOUZA, 2009):

- O controle de processos deve ser entendido como o controle de periféricos, tais como: diodos emissores de luz (*LEDS*), botões, mostradores (*displays*) de segmentos, mostradores de cristal líquido (*LCD*), resistências, relés, sensores diversos (pressão, temperatura, dentre outros) e muitos outros.
- São chamados de controladores lógicos, pois a operação do sistema baseia-se nas ações lógicas que devem ser executadas, dependendo do estado dos periféricos de entrada e, ou, de saída.
- O microcontrolador é programável, pois toda a lógica de operação mencionada nos dois itens anteriores é estruturada na forma de um programa e gravada dentro do componente. Depois disso, toda vez que o microcontrolador for alimentado, o programa interno será executado.
- Quanto à “inteligência” do componente, pode-se associá-la à Unidade Lógica Aritmética (ULA), pois é nessa unidade que todas as operações matemáticas e lógicas são executadas. Quanto mais poderosa for a ULA do componente, maior sua capacidade de processar informações.
- O adjetivo “pequeno” é porque em uma única pastilha de silício encapsulada (popularmente chamada de CI ou *CHIP*) têm-se todos os componentes necessários ao controle de um processo, ou seja, o microcontrolador está provido internamente de memória de programa, memória de dados, portas de entrada e, ou, de saída paralela, temporizadores (relógios), contadores, comunicação serial, modulações por largura de pulsos (PWMs), conversores analógico-digitais, dentre outros. Esta é uma das características fundamentais que diferencia os microcontroladores dos microprocessadores, pois os

microprocessadores, apesar de possuírem uma ULA muito mais poderosa, não possuem todos esses recursos em uma única pastilha.

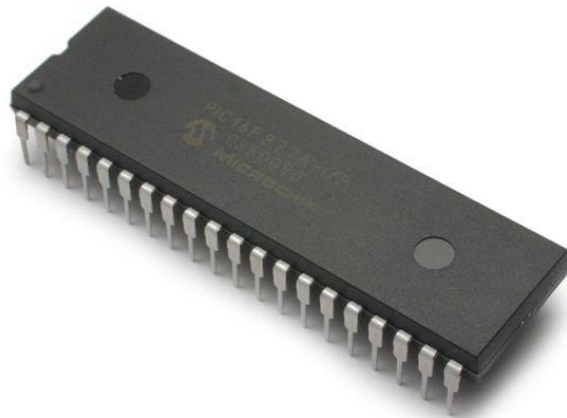


Figura 2.9 – Microcontrolador PIC. Fonte: The Microchip (2008).

### **2.5.1. Interrupções**

Uma interrupção serve para interromper o programa imediatamente. Desta maneira, podem-se tomar atitudes instantâneas. As interrupções são ações tratadas diretamente pelos componentes físicos (*hardware*), o que as torna muito rápidas e disponíveis em qualquer ponto do sistema. Desta forma, quando uma interrupção acontece, o programa é paralisado, uma função específica (definida pelo programador) é executada, e depois o programa continua a ser executado no mesmo ponto em que estava. Elas servem para a solução de muitos problemas complexos (SOUZA, 2009).

### **2.5.2. Portas**

O estado das portas em um microcontrolador é acessado diretamente em duas posições distintas da memória. Quando um pino dessas portas é configurado como entrada, ao ler o seu dígito binário (*bit*) relacionado, encontra-se diretamente o nível lógico aplicado a esse pino. Da mesma maneira, configurando um pino como sendo uma saída, pode-se alterar o seu estado, escrevendo diretamente no dígito binário relacionado (SOUZA, 2009).

### 2.5.3. Comunicação Serial

Na comunicação serial, a transmissão de dados é feita dígito por dígito (*bit a bit*), ou seja, é transmitido um dígito binário de cada vez. A informação  $001110010_2$ , por exemplo, é transmitida entre dois pontos, e na linha de transmissão é colocado apenas um dígito binário de cada vez, começando pelo dígito binário menos significativo. Cada dígito binário permanece na linha de transmissão durante um tempo predefinido, chamado período do dígito binário, para que possa ser lido. A comunicação serial pode ter somente uma linha de transmissão. Esta é uma característica que faz com que ela seja uma forma muito utilizada de transmissão de dados, principalmente em transmissões de longa distância (ZANCO, 2005).

### 2.5.4. Modulação por Largura de Pulso (PWM)

O sinal de modulação por largura de pulso (PWM) consiste num sinal de frequência fixa em que é variado o ciclo ativo da onda. É muito utilizado no controle de potência (fontes chaveadas, controles de velocidade, dentre outros), além de servocomandos e outros dispositivos (PEREIRA, 2007).

Este é o modo de funcionamento mais poderoso do módulo CCP (*Compare, Capture e PWM*) e pode ser utilizado em diversas aplicações, como, por exemplo, conversor digital/analógico, fontes chaveadas, dispositivo de prevenção de falta de energia (*nobreaks*), dentre outros. O PWM é um sinal digital com frequência fixa, mas com largura de pulso (ciclo ativo) variável. Pode-se dizer que o ciclo ativo é a parte do ciclo em que o sinal permanece em nível 1. A Figura 2.10 permite visualizar o seu conceito e a Equação 2.29 permite calcular o valor médio da tensão em corrente contínua,  $V_{cc}$ , de um sinal PWM (ZANCO, 2005).

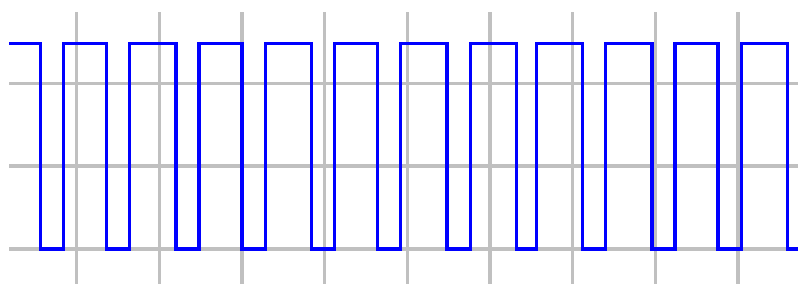


Figura 2.10 – Forma de onda de um sinal PWM.

$$V_{cc} = \left( \frac{t_{\text{ciclo ativo}}}{T_{\text{PWM}}} \right) V_{\text{alto}} \quad (2.29)$$

em que:

- $t_{\text{ciclo ativo}}$  - tempo correspondente ao ciclo ativo, s.
- $T_{\text{PWM}}$  - período do sinal PWM, s.
- $V_{\text{alto}}$  - valor da tensão em nível 1, V.

### 2.5.5. Conversor Analógico-Digital

O conversor analógico-digital (*Analog to Digital Converter - ADC*) é um dispositivo que, geralmente, está disponível nos microcontroladores.

Conectar um circuito digital a dispositivos sensores é simples se estes dispositivos forem de natureza digital. Chaves, relés e codificadores são facilmente interfaceados com circuitos digitais devido à natureza liga/desliga dos seus sinais. No entanto, quando dispositivos analógicos são envolvidos, o interfaceamento se torna muito mais complexo. Neste caso, é preciso de um modo para transformar eletronicamente o sinal analógico em quantidades digitais (binárias), e vice versa. Um conversor analógico-digital recebe um sinal elétrico analógico, como tensão ou corrente, e emite um número binário correspondente, de acordo com o esquema da Figura 2.11 (KUPHAKDT, 2007).

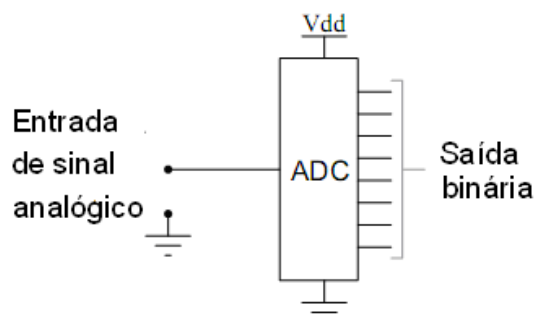


Figura 2.11 – Conversor analógico-digital.

### **3. METODOLOGIA**

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Eletrificação Rural do Setor de Energia na Agricultura e no Laboratório de Hidráulica da Área de Recursos Hídricos e Ambientais, ambos pertencentes ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais.

O trabalho foi realizado em duas etapas:

- i. Desenvolvimento de sensor para medir o teor de água do solo.
- ii. Desenvolvimento de sistema de controle e automação para manejo de irrigação.

#### **3.1. DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE TEOR DE ÁGUA DO SOLO**

##### **3.1.1. Construção do Sensor**

Os sensores de teor de água do solo foram desenvolvidos com base na medição indireta da constante dielétrica do material de solo localizado entre três hastes paralelas de aço inoxidável, revestidas com material isolante.

Na construção do sensor capacitivo foram utilizadas hastes de aço inoxidável, resina de poliéster líquida, catalisador, cabo coaxial com impedância de  $50\Omega$  e verniz isolante do tipo usado nos enrolamentos de motor elétrico.

O procedimento de construção e o dimensionamento do sensor foram praticamente os mesmos utilizados com o TDR por Santos (2008), acrescentando-se o verniz isolante. Primeiro, as hastes de aço inoxidável, com diâmetro de 6mm, foram cortadas em 21 pedaços com comprimento de 13cm. Como cada sensor possui três hastes, foram construídos sete sensores. Em seguida, cada grupo de três hastes foi soldado a 2m de cabo coaxial, sendo que seu fio rígido central foi soldado a uma haste e sua malha de fios foi soldada às outras duas hastes.

Então, estas hastes foram dispostas na vertical em uma estrutura construída de madeira, de modo que ficassem paralelas entre si e espaçadas de 2 cm em cada sensor. Em seguida, um molde de folha metálica foi inserido

na parte superior desta estrutura de madeira, para que a resina pudesse ser vazada.

A resina foi misturada ao catalisador durante, aproximadamente, 10 minutos e, em seguida, foi vazada no molde de folha metálica. Desta maneira, a resina cobriu 3 cm das hastes, restando 10 cm de comprimento efetivo para realizar as medições do sensor.

Para evitar que os sensores ficassem colados nos moldes, antes que a resina se solidificasse totalmente, eles foram retirados deles. Em seguida, as hastes de cada sensor foram revestidas com verniz isolante. O esquema da Figura 3.1 resume este procedimento. No entanto, só foram representados três sensores.

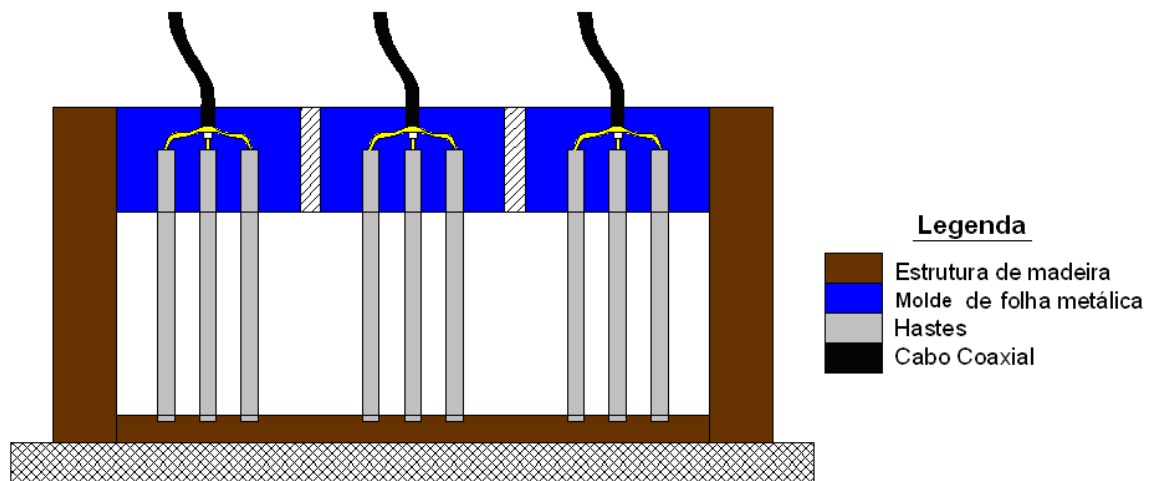


Figura 3.1 – Esquema de construção dos sensores de teor de água do solo.

Em seguida, as hastes de cada sensor foram revestidas com verniz isolante.

Depois de realizar o procedimento de calibração, descrito mais adiante, observou-se que o sinal de medição dos sensores aumentou no início do experimento. Como esse resultado não era esperado, outro tipo de revestimento foi testado, nesse caso, massa epóxi. Portanto, retirou-se o verniz de três sensores, utilizando uma lixa d'água e, em seguida, aplicou-se esse material nas hastes.

### 3.1.2. Circuito de Medição em Ponte de Corrente Alternada

O primeiro circuito testado para medir a variação de capacitância dos sensores foi baseado em uma ponte de corrente alternada (Figura 3.2).

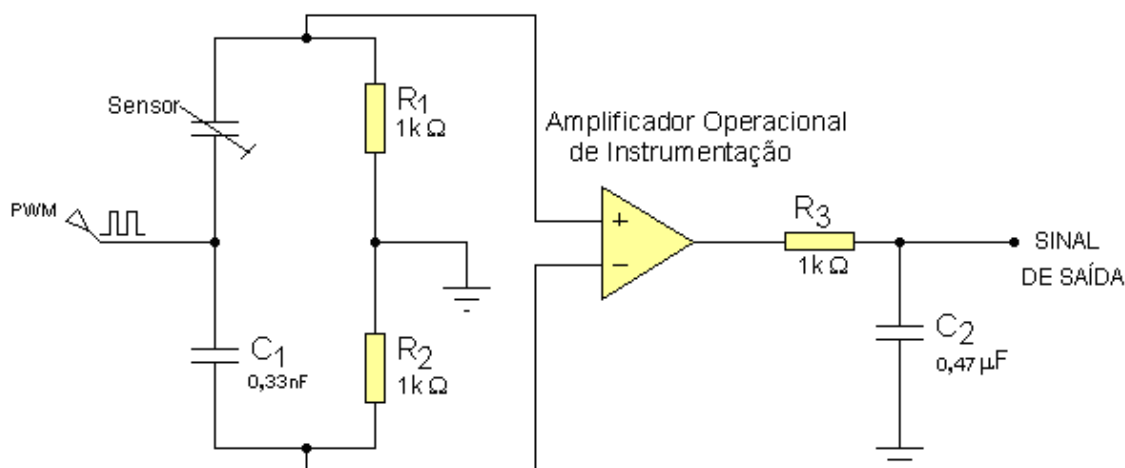


Figura 3.2 – Circuito de medição utilizando ponte em corrente alternada.

O equilíbrio da ponte foi ajustado para o menor valor de capacitância do sensor, ou seja, com ele em vazio (no ar).

Esse circuito de medição possui um microcontrolador que, além de fornecer uma onda quadrada de 625 kHz para alimentar a ponte, converte o sinal analógico de saída do circuito em um número digital de 10 dígitos binários (10 bits).

Este microcontrolador foi programado para executar 16 medições deste sinal de entrada, em intervalos de 10 ms, e retornar sua média. O sinal de saída é disponibilizado no formato digital, pela porta serial.

### 3.1.3. Circuito de Medição Oscilador

Outro circuito testado para a medição das variações de capacitância dos sensores foi baseado no circuito integrado temporizador 555 (Figura 3.3), em configuração astável. Nesse modo, a frequência do seu sinal de saída depende da capacitância do sensor, único parâmetro variável no circuito.

Este circuito também possui um microcontrolador, que detecta o período em que o sinal de saída permanece em nível baixo. Este microcontrolador foi

programado para realizar oito detecções consecutivas e retornar a média das oito medições.

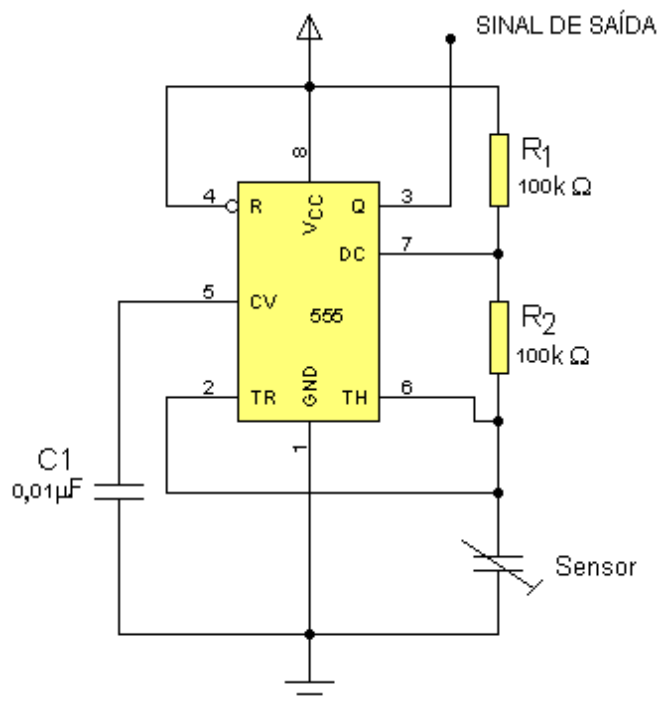


Figura 3.3 – Circuito de medição utilizando oscilador.

#### 3.1.4. Calibração dos Sensores

Os sensores foram calibrados tomando-se como referência o método padrão de estufa. Para isso, foram construídos três recipientes utilizando cano de PVC com diâmetro nominal de 100mm, tampão de PVC com diâmetro de 100mm e tela de náilon. O cano foi cortado em pedaços de 26cm e foi feito um furo no centro do tampão de, aproximadamente, 2cm de diâmetro, para que a água pudesse escoar. No entanto, foi colocada sobre este furo a tela de náilon, para evitar que o solo também saísse do recipiente.

O material de solo utilizado nesse trabalho foi proveniente de um Neossolo Quartzarênico, cujas características físico-hídricas e químicas estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades físico-hídricas e químicas do Neossolo Quartzarênico

Características Físico- Hídricas		Características Químicas	
Areia Grossa (kg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	0,63	pH em água	5,34
Areia Fina (kg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	0,24	pH em KCl	4,38
Silte (kg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	0,02	P (mg dm <sup>-3</sup> )	2,10
Argila (kg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	0,11	K (mg dm <sup>-3</sup> )	46,0
Massa específica do solo (kg dm <sup>-3</sup> ) <sup>3</sup>	1,49	Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,76
Massa específica das partículas (kg dm <sup>-3</sup> ) <sup>4</sup>	2,73	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,10
Retenção de água a -10 kPa (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>5</sup>	0,09	Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,19
Retenção de água a -1.500 kPa (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>5</sup>	0,05	H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,10
Porosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>6</sup>	0,45	SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,98
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>7</sup>	0,36	CTC (t) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,17
Microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>8</sup>	0,09	CTC (T) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,08
Condutividade Hidráulica (cm h <sup>-1</sup> ) <sup>9</sup>	52,81	V (%)	47,10
		m (%)	16,20
		Matéria orgânica (dag kg <sup>-1</sup> )	0,78
		P-rem (mg L <sup>-1</sup> )	41,9
1. Por peneiramento		• P – Na – K – Extrator Mehlich 1	
2. Método da Pipeta		• Ca – Mg – Al – Extrator: KCl – 1 mol L <sup>-1</sup>	
3. Método da proveta e anel volumétrico para S1 e S2 respectivamente		• H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L <sup>-1</sup> – pH 7,0	
4. Método do balão volumétrico		• SB = Soma de Bases	
5. Equipamento de placa porosa		• CTC (t) – Capacidade de Troca Catiônica Efetiva	
6. Calculada: $PT = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p}$		• CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0	
7. Por diferença: PMACRO = PTOTAL - PMICRO		• V = Índice de Saturação de Bases	
8. Mesa de tensão		• m = Índice de Saturação de Alumínio	
9. Em meio saturado, permeação de carga constante		• Mat. Org = C. Org x 1,724 – Walkley-Black	
		• P-rem = Fósforo Remanescente	

Foi estabelecida uma altura de 14 cm para a coluna de material de solo em cada recipiente. Portanto, como o diâmetro interno do recipiente é de 9,8 cm, para esta altura o volume é 1,056 dm<sup>3</sup>. A partir da massa específica do solo de 1,49 kg dm<sup>-3</sup>, calculou-se a massa de solo para cada recipiente, obtendo-se o valor de 1,573 kg.

Os três recipientes, já contendo 1,573 kg de solo cada, foram inseridos em outro recipiente contendo água para saturar as amostras.

No primeiro experimento, utilizando os sensores de hastes recobertas por verniz isolante, as amostras permaneceram dentro deste recipiente por, aproximadamente, 72 horas. No segundo experimento, utilizando os sensores de hastes recobertas por massa epóxi, esse período foi reduzido para 40 horas, pois este tempo já foi suficiente para saturar as amostras de solo.

Depois desse período de saturação, as amostras de solo foram retiradas do recipiente contendo água e nelas foram inseridos os sensores, um em cada amostra. Em seguida, foram medidos os sinais destes sensores e a massa de cada amostra, as quais foram colocadas em uma estufa de secagem. Esse procedimento foi repetido diariamente (Figura 3.4).

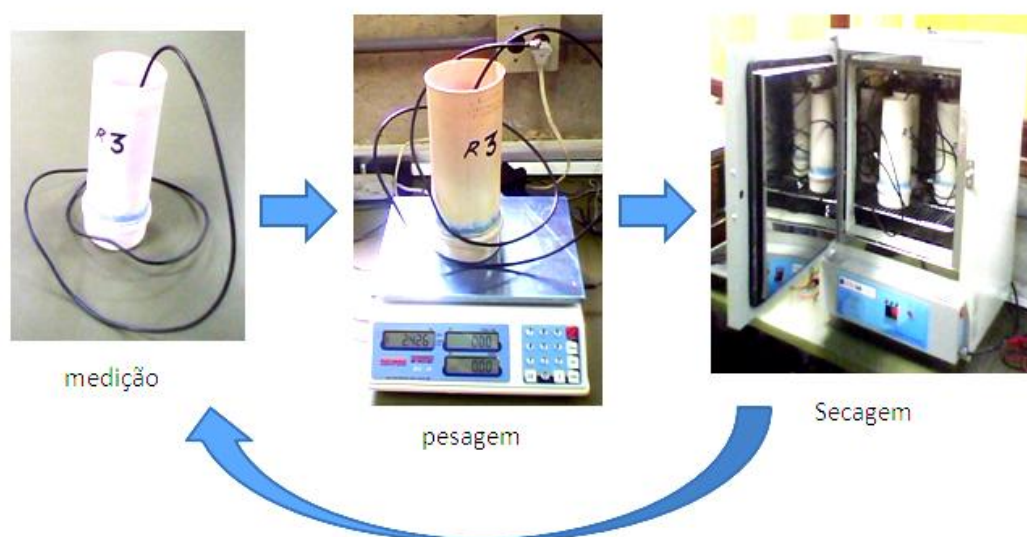


Figura 3.4 – Procedimentos adotados na calibração dos sensores.

No primeiro experimento, a temperatura da estufa foi ajustada em, aproximadamente, 65°C. Já no segundo, aproximadamente 45°C, para evitar possível dano aos sensores.

Nos dois experimentos, depois de retirar as amostras da estufa, esperou-se tempo suficiente para que a temperatura das amostras de solo fosse reduzida a, aproximadamente, 35°C.

Quando a variação da quantidade de água nas amostras de solo se tornou, praticamente, constante, as amostras de solo foram inseridas em

recipientes de vidro e colocadas em uma estufa a 105°C durante 24 horas, para determinação da massa de solo seco.

Foram medidas as massas de cada recipiente e de cada sensor separadamente, antes de preenchê-los com solo. Desta maneira, ao fim do experimento, calculou-se o teor de água do solo em cada instante de medição.

O teor de água do solo,  $u$ , é a razão entre a massa de água e a massa de solo seco, expressa em percentagem em peso (BERNARDO et al., 2006).

A partir dos dados experimentais de teor de água, ajustou-se, por meio de regressão linear, um modelo matemático para estimar o teor de água do solo em função das medições do sinal fornecido pelo equipamento, expresso pela Equação 3.1.

$$u_e = \sum_{i=0}^{i=3} a_i v^i \quad (3.1)$$

em que

- $u_e$  - valor estimado do teor de água do solo,  $\text{kg kg}^{-1}$ ;
- $v$  - sinal de tensão medido pelo sensor, V;
- $a_i$  - coeficientes de regressão.

Como a finalidade do uso do sensor é para medir o teor de água visando à automação de sistemas de irrigação, foram considerados apenas os teores de água do solo entre a capacidade de campo o ponto de murcha permanente.

Para estimar a precisão do sensor, considerando 95% de probabilidade de ocorrência de erro aleatório, ou seja, dois desvios-padrão para mais ou para menos em relação ao valor estimado do teor de água do solo, utilizou-se a metodologia apresentada por Doebelin (1990). O desvio padrão do teor de água do solo estimado foi calculado aplicando-se a Equação 3.2.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N [u_e - u_{o_i}]^2} \quad (3.2)$$

em que

- $s$  - desvio padrão do teor de água do solo,  $\text{kg kg}^{-1}$ ;
- $u_e$  - valor estimado do teor de água do solo,  $\text{kg kg}^{-1}$ ;

- $u_o$  - valor observado do teor de água do solo,  $\text{kg kg}^{-1}$ ;
- $n$  - número total de observações.

## **3.2. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

### **3.2.1. Circuito de Acionamento do Sistema de Irrigação**

Foi desenvolvido um sistema de controle e automação para manejo de irrigação com base em um microcontrolador, que controla as saídas de relés de estado sólido para acionamento do conjunto moto-bomba e de válvulas solenóides.

Entre o microcontrolador e os relés, foram utilizados circuitos integrados optoacopladores para isolar eletricamente a parte de comando da parte de potência, protegendo, assim, o sistema contra descargas de tensão da rede de alimentação.

Para diminuir a potência do conjunto moto-bomba e reduzir o diâmetro das tubulações, a área total a ser irrigada é dividida em partes menores (setores), que são irrigados individualmente. As válvulas solenóides servem para direcionar o fluxo de água proveniente do conjunto moto-bomba para um determinado setor.

Com base nos dados de teor de água do solo, estratégias de controle inteligentes foram implementadas no programa do microcontrolador, que gerencia e comanda todo o sistema de irrigação. Desta forma, a utilização de água e energia é racionalizada.

Os dados dos sensores e os parâmetros de configuração do sistema são visualizados em um visor de cristal líquido. Os parâmetros de configuração são alterados por meio de botões. Além disso, foi configurada a porta USB deste microcontrolador para haver a possibilidade de enviar os dados coletados pelos sensores instalados no campo, em tempo real, para um computador, além dos sinais de falha na transmissão sem fio. Todavia, o computador não é imprescindível ao funcionamento do sistema. Trata-se apenas de um acessório para monitoramento ou para aquisição de dados.

### 3.2.2. Programação dos Microcontroladores

Os programas dos microcontroladores foram elaborados em linguagem de programação C.

O programa do microcontrolador possui quatro modos de operação: **manual**, **timer**, **auto** e **smart**.

- **manual** - o acionamento da bomba e das válvulas é feito por meio de botões. As válvulas são acionadas seqüencialmente, uma após a outra.
- **timer** - determina-se, por meio de botões, o tempo de funcionamento de cada válvula e o horário de início do acionamento diário do sistema.
- **auto** - semelhante ao modo **timer**; no entanto, o acionamento é condicionado pelo sinal do sensor. Se o sensor de um determinado setor realizar uma leitura superior ao parâmetro **limite superior**, a válvula que direciona a água para este setor é desativada. Então, aciona-se a próxima válvula, exceto se a leitura dos sensores deste outro setor também já tiver atingido este limite superior de teor de água. Determinam-se os parâmetros **limite superior** e **limite inferior** por meio de botões, visualizando-os no visor de cristal líquido.
- **smart** - determina-se o tempo de funcionamento de cada válvula e os parâmetros **limite inferior** e **limite superior** do sensor. Ao decorrer do dia, se o sinal do sensor de um setor estiver menor do que o parâmetro **limite inferior** a bomba e a válvula que direciona a água para este setor são acionadas até que o sinal do sensor se torne maior do que o parâmetro **limite superior** ou até esgotar-se todo o tempo de funcionamento da válvula. Os tempos de funcionamento das válvulas são atualizados diariamente.

Para os modos **timer**, **auto** e **smart**, é possível selecionar os dias da semana nos quais o sistema deve entrar em operação.

Devido à tarifação da energia na zona rural ser diferenciada de acordo com o horário, no modo **smart** é possível determinar uma faixa de horário diário na qual o sistema não deve funcionar.

Além disso, outras estratégias de controle inteligente podem ser implementadas, bastando apenas atualizar o programa do microcontrolador, visando sempre o aumento da produtividade e a racionalização dos recursos energéticos e hídricos.

### 3.2.3. Transmissão dos Dados

Diante da dificuldade de se instalar fios e cabos na área a ser cultivada, além da possibilidade de que eles sejam danificados por equipamentos agrícolas, desenvolveu-se uma rede sem fio para realizar a transmissão dos dados de cada sensor até o painel controlador, baseada no padrão IEEE 802.15.4 (XBEE/XBEE-PRO, 2008).

A transmissão sem fio dos sinais de cada sensor até o painel de acionamento é feita por meio de módulos de rádio que operam em uma frequência de 2,4 GHz, possuem taxa de transmissão de até 250 kbps e têm alcance de transmissão de mais de 1,6 km (Figura 3.5).

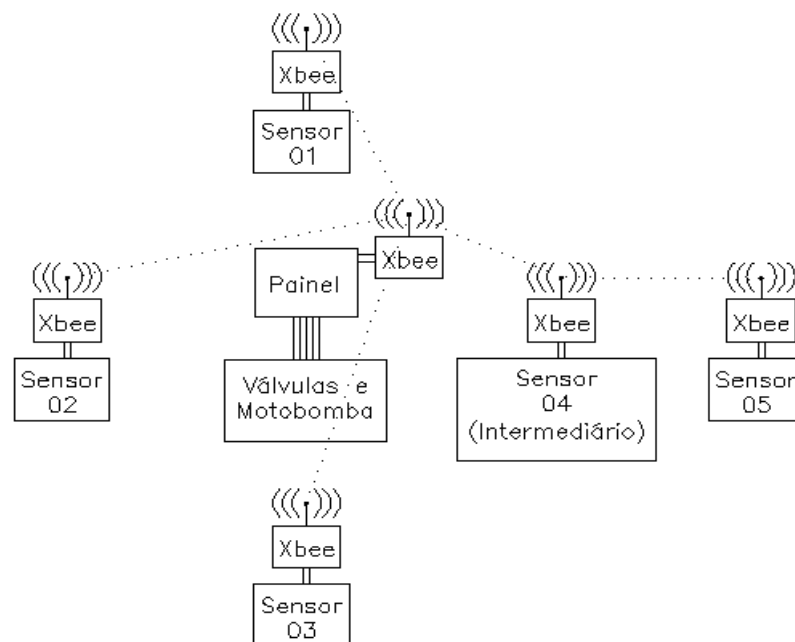


Figura 3.5 - Esquema da transmissão sem fio dos sinais de cada grupo de sensores até o painel de acionamento.

A rede é estabelecida entre os microcontroladores do painel e do circuito de medição de cada sensor por meio de seus módulos de comunicação serial

assíncrona. Essa comunicação entre microcontroladores é intermediada pelos módulos de rádio frequência, eliminando a necessidade dos fios.

A rede foi projetada para operar com topologia estrela e arquitetura mestre-escravo. Na Figura 3.5, o microcontrolador do painel controlador é o mestre; e os microcontroladores dos sensores, os escravos. Portanto, o mestre (painel) pode se comunicar com todos os escravos (sensores) e cada escravo só pode se comunicar com o mestre, ou seja, eles não se comunicam entre si.

O painel solicita o sinal de cada sensor por meio de seu endereço. Assim que o sensor recebe o pedido, ele responde com seu sinal de medição para o painel. Esse sinal é armazenado temporariamente na memória do microcontrolador do painel em um vetor, de modo que a posição dos dados nesse vetor representa o endereço de cada sensor. Portanto, cada sensor possui um endereço fixo.

O painel realiza três tentativas de pedido para cada sensor e armazena em outro vetor possíveis falhas na transmissão. Se a terceira tentativa falhar, ou seja, se o sensor não responder ao pedido, retorna-se um sinal de falha para esse sensor.

Esses dois vetores podem ser armazenados em um computador em tempo real por meio da porta USB presente no painel. Deste modo, gráficos e mapas podem ser elaborados com os dados de teor de água do solo do local. Por meio desses dados, também é possível identificar problemas na transmissão de dados ou sensores defeituosos.

A única exceção para comunicação entre escravos é o caso da repetição de sinal. Quando houver um sensor muito distante do painel, ultrapassando o alcance do módulo de transmissão, seu sinal pode ser retransmitido por um sensor localizado entre ele e o painel. Nesse caso, o sensor intermediário passa a ser mestre por alguns instantes. O painel envia o pedido do sinal do sensor mais distante para o sensor intermediário, que repassa o pedido adiante. Em seguida, o sensor mais distante responde para o sensor intermediário, que repassa o sinal para o painel. Este caso está ilustrado pelos sensores 04 e 05 da Figura 3.5.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. SENSORES

#### 4.1.1. Hastes Revestidas por Verniz Isolante

Foram construídos sete sensores com hastes revestidas por verniz (Figura 4.1).

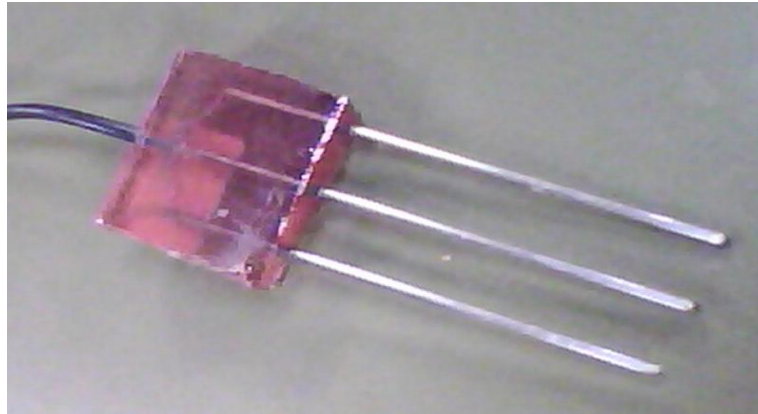


Figura 4.1 – Sensor de teor de água do solo com hastes revestidas por verniz isolante.

Para verificar se o procedimento de construção dos sensores foi uniforme, utilizando um multímetro digital, mediu-se a capacitância de cada um em duas situações: (i) em vazio (ar entre as hastes) e (ii) inserido em água. Os dados obtidos encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Capacitância de cada sensor com hastes revestidas com verniz, imersos no ar e na água

Sensor	Capacitância (nF)	
	Imersos no ar	Imersos na água
1	0,34	0,90
2	0,35	0,87
3	0,34	0,87
4	0,35	0,81
5	0,35	0,80
6	0,35	0,83
7	0,35	0,83
Média	0,347	0,844
Desvio Padrão	0,0049	0,036

Os dados de capacitância mostram, claramente, que não houve, praticamente, diferenças entre os sensores, indicando que o processo de construção deles foi plenamente satisfatório.

A resistência elétrica dos sensores também foi medida nas duas situações, para verificar se o verniz isolante foi aplicado de maneira correta e em quantidade suficiente, evitando a circulação de corrente elétrica entre as hastes. De acordo com o multímetro utilizado, o verniz proporcionou resistência elétrica maior que  $40\text{ M}\Omega$  entre as hastes, mesmo no caso mais crítico, quando os sensores estavam imersos em água.

#### **4.1.2. Hastes Revestidas por Massa Epóxi**

Os dados de capacitância e resistência dos três sensores com hastes revestidas com massa epóxi (Figura 4.2) estão contidos na Tabela 4.2. Neste teste, também foi medida a capacitância do sensor para diferentes temperaturas da água.

A constante dielétrica da água diminui com o aumento da temperatura (LEGUENZA et al., 2005). A capacitância dos sensores de teor de água do solo é diretamente proporcional à constante dielétrica do material localizado entre as hastes. Portanto, os dados da Tabela 4.2 indicam exatamente o contrário dos resultados obtidos por Leguenza et al. (2005).

Esse fato ocorreu porque a água utilizada por Leguenza era destilada e deionizada. Dessa forma, os efeitos de condução proporcionados pelos sais contidos na água foram praticamente eliminados. Neste trabalho foi utilizada água potável.

Possivelmente, a constante dielétrica aumentou com a temperatura nesse experimento porque o aumento da temperatura fez com que aumentasse ainda mais a condutividade elétrica da água. Salmazo et al. (2006) ressalta que o aumento da temperatura aumenta a condutividade elétrica dos materiais dielétricos. De acordo com a Equação 2.24, esse fato implica no aumento da componente imaginária da constante dielétrica complexa, que está relacionada com perdas capacitivas.



Figura 4.2 – Sensor de teor de água do solo com hastes revestidas com massa epóxi.

Tabela 4.2 – Capacitância de cada sensor com hastes revestidas com massa epóxi, imersos no ar e na água, em função do material localizado entre as hastes (ar ou água)

Sensor	Temperatura (° C)									
	Ar	Água								
	29,0	6,0	12,0	17,5	22,0	26,0	31,5	36,0	39,5	48,5
Capacitância (nF)										
4	0,34	0,57	0,60	0,61	0,63	0,65	0,68	0,72	0,73	0,80
6	0,36	0,56	0,59	0,60	0,62	0,64	0,67	0,70	0,72	0,79
7	0,36	0,59	0,61	0,63	0,63	0,65	0,68	0,73	0,74	0,81
Média	0,353	0,573	0,600	0,613	0,627	0,647	0,677	0,717	0,730	0,800

A temperatura influenciou muito mais a componente imaginária da constante dielétrica complexa do que a componente real, pois mesmo que a constante dielétrica real da água diminuísse com a temperatura, sua parte imaginária aumentou muito, aumentando a constante dielétrica aparente, que representa o módulo da constante dielétrica complexa.

Portanto, na continuação desse trabalho, outros tipos de material isolante para revestir as hastes do sensor devem ser testados, a fim de aumentar a capacidade de isolamento do sensor.

## 4.2. CIRCUITO DE MEDIÇÃO DOS SENSORES

Em todo o experimento, os circuitos de medição foram utilizados na matriz de contatos (*protoboard*), de acordo com a Figura 4.3. Isso pode ter contribuído para o surgimento de ruídos no circuito, afetando sua precisão. Para evitar esse tipo de problema, o circuito definitivo deverá ser construído em uma placa de circuito impresso.

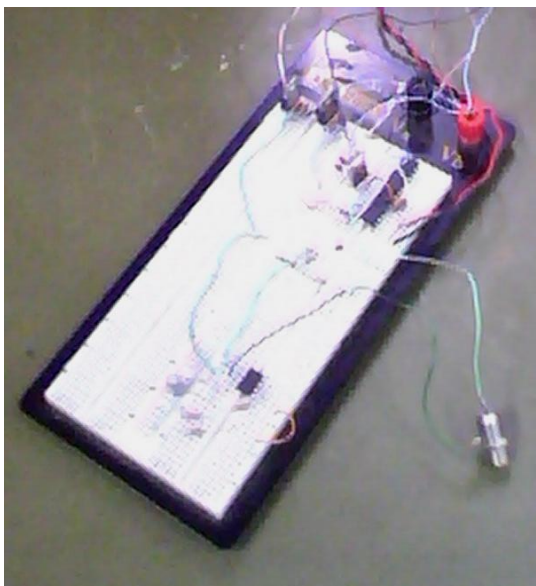


Figura 4.3 – Circuito de medição dos sensores.

### 4.2.1. Ponte em Corrente Alternada

O circuito de medição em ponte de corrente alternada forneceu, em alguns momentos do experimento, oscilações nas leituras de até oito unidades, para mais e para menos. Isso ocorreu quando o teor de água foi maior do que 22% em peso, aproximadamente. No entanto, esse teor de água do solo está fora da região de trabalho do sensor: entre capacidade de campo e ponto de murcha. Observou-se também que este circuito apresentou maior sensibilidade para medições próximas à condição de equilíbrio da ponte. Isso pôde ser verificado pelo tipo de modelo matemático (exponencial) que melhor se ajustou aos dados observados.

## **4.2.2. Circuito Oscilador**

O circuito de medição oscilador apresentou menos oscilações nas suas leituras do que o circuito de ponte em corrente alternada, variando em até uma unidade, para mais ou para menos. Isso ocorreu, geralmente, para teores de água do solo entre 5 e 19%, aproximadamente. No entanto, não se pôde concluir a respeito de qual circuito é mais eficiente na medição da constante dielétrica, porque eles foram testados em sensores com hastes recobertas por diferentes materiais. O circuito em ponte de corrente alternada foi utilizado com sensores com hastes recobertas por verniz isolante e no circuito oscilador foi utilizada massa epóxi. Por isso, não se pode concluir, por exemplo, qual circuito é menos susceptível aos efeitos de perda capacitiva.

A frequência do sinal de saída desse circuito, que é proporcional à variação da capacitância do sensor, variou na faixa de 4 a 14 kHz, aproximadamente.

Outras frequências devem ser testadas, pois o aumento da frequência também diminui os efeitos de perda capacitiva (SALMAZO et al., 2006). Conseqüentemente, a parte imaginária da constante dielétrica se torna menor, fazendo com que a constante dielétrica aparente (resultante) se torne mais próxima da real. No entanto, quanto maior a frequência, o circuito fica mais susceptível a ruídos. Deve-se encontrar um ponto de equilíbrio entre esses dois limiares.

Na continuação deste trabalho, depois de ser encontrado um bom material isolante para recobrir as hastes do sensor, deve-se avaliar qual dos dois circuitos é menos susceptível à variações de temperatura no solo.

## **4.3. CALIBRAÇÃO**

### **4.3.1. Sensores com Hastes Recobertas por Verniz**

Neste experimento foi utilizado o circuito de medição em ponte de corrente alternada. Dos sete sensores construídos, os três mais uniformes foram selecionados para realizar a calibração. Esta calibração foi realizada somente para o Neossolo Quartzarênico. Novas calibrações são necessárias

para outros tipos de solo. Os dados de calibração dos sensores para este tipo de solo encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Teor de água do solo, em peso, e sinal de saída do circuito de medição

Repetição 1		Repetição 2		Repetição 2	
Teor de água (kg kg <sup>-1</sup> )	Sinal do sensor (V)	Teor de água (kg kg <sup>-1</sup> )	Sinal do sensor (V)	Teor de água (kg kg <sup>-1</sup> )	Sinal do sensor(V)
0,289	2,659	0,280	2,659	0,285	2,654
0,281	2,659	0,263	2,688	0,275	2,659
0,276	2,654	0,262	2,654	0,269	2,688
0,273	2,659	0,259	2,654	0,258	2,659
0,272	2,674	0,257	2,659	0,258	2,688
0,268	2,688	0,250	2,654	0,252	2,688
0,266	2,664	0,248	2,654	0,250	2,688
0,260	2,688	0,242	2,683	0,245	2,688
0,259	2,688	0,241	2,688	0,244	2,688
0,255	2,688	0,237	2,669	0,241	2,688
0,254	2,688	0,235	2,688	0,240	2,688
0,253	2,688	0,235	2,654	0,239	2,664
0,249	2,698	0,232	2,654	0,236	2,688
0,241	2,678	0,223	2,654	0,229	2,664
0,232	2,669	0,211	2,654	0,219	2,693
0,223	2,654	0,203	2,634	0,210	2,654
0,220	2,654	0,200	2,654	0,207	2,654
0,212	2,654	0,188	2,654	0,198	2,654
0,201	2,654	0,177	2,654	0,185	2,654
0,199	2,654	0,176	2,654	0,183	2,688
0,180	2,654	0,156	2,654	0,162	2,654
0,170	2,654	0,143	2,654	0,148	2,654
0,162	2,654	0,134	2,654	0,138	2,654
0,131	2,630	0,105	2,522	0,106	2,576
0,124	2,576	0,097	2,527	0,099	2,542
0,122	2,576	0,095	2,502	0,096	2,532
0,117	2,551	0,090	2,502	0,092	2,502
0,115	2,556	0,088	2,502	0,090	2,502
0,104	2,502	0,078	2,434	0,080	2,468
0,098	2,502	0,072	2,434	0,073	2,424
0,093	2,502	0,068	2,434	0,070	2,454
0,087	2,502	0,063	2,502	0,064	2,512
0,079	2,370	0,056	2,346	0,057	2,346
0,077	2,370	0,054	2,346	0,055	2,346
0,070	2,346	0,048	2,346	0,048	2,268
0,000	1,652	0,000	1,716	0,000	1,603

De acordo com os dados das três repetições, foi ajustado um modelo matemático para estimar o teor de água do solo, entre o ponto de murcha (teor de água igual a 7,5%) e a capacidade de campo (teor de água igual a 13,4%), em função do sinal de saída do sensor. O modelo foi obtido por meio de regressão, utilizando o método dos mínimos quadrados implementado na planilha eletrônica Excel.

O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o representado pela Equação 4.1, com coeficiente de determinação igual a 93,17%, indicando que o modelo explica bem as variações no teor de água do solo em função da capacitância.

$$U = -4,4685 V^3 + 34,1512 V^2 - 86,665 V + 73,13 \quad (4.1)$$

em que

- U - teor de água do solo estimado, em base seca,  $\text{kg kg}^{-1}$ ; e
- V - sinal de tensão na saída do sensor, V.

A estimativa do teor de água do solo está representada graficamente na Figura 4.4, em função do sinal de tensão medido pelos sensores.

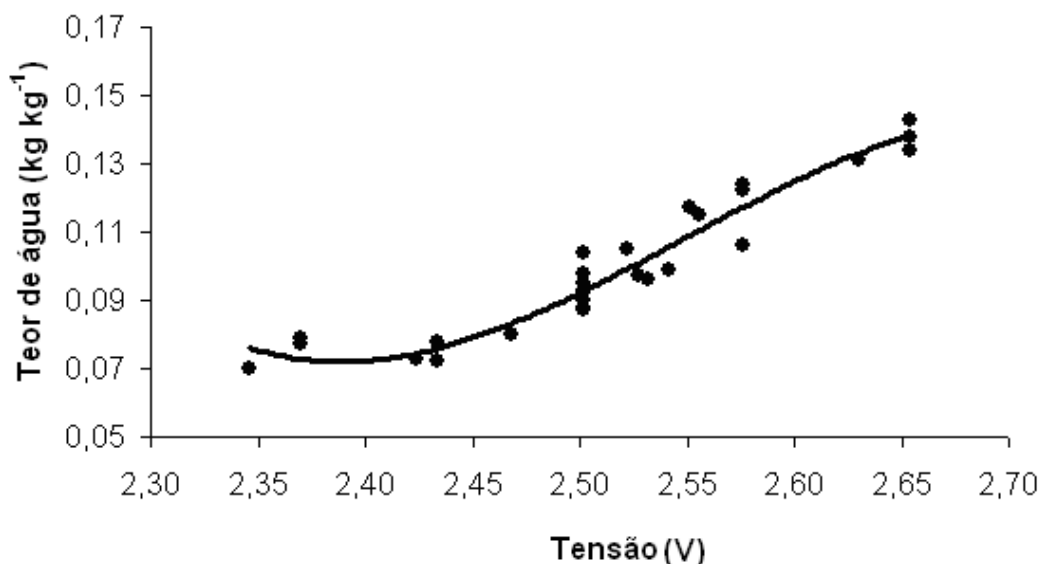


Figura 4.4 – Variação do teor de água, U, em peso, em função do sinal de tensão, V, na saída do sensor.

O gráfico de correspondência entre os dados observados e os dados estimados do teor de água do solo está representado na Figura 4.5. De acordo com o modelo ajustado, o sensor apresentou precisão de  $\pm 0,010 \text{ kg kg}^{-1}$ .

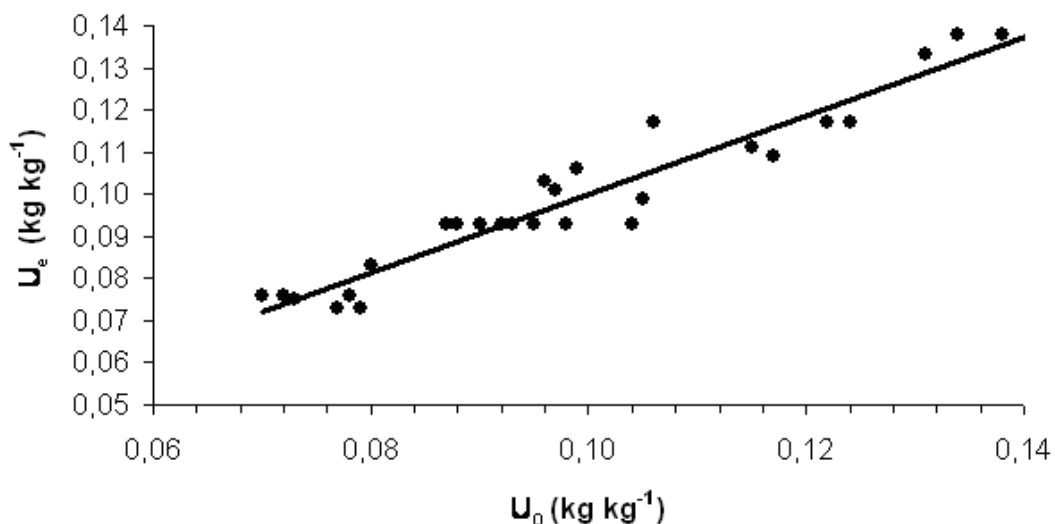


Figura 4.5 – Teor de água do solo estimado ( $U_e$ ) em função do teor de água do solo observado ( $U_o$ ).

Era esperado que a máxima capacitância fosse aquela medida com o sensor totalmente imerso em água, pois a constante dielétrica da água é muito maior comparada à constante dielétrica dos demais componentes do solo, conforme Tabela 4.4 (SILVA, 2005). Portanto, à medida que a quantidade de água fosse diminuindo, esperava-se que a capacitância também diminuísse. No entanto, de acordo com os dados da Tabela 4.3, observa-se que, no início do experimento, o sinal de medição, que é proporcional à capacitância do sensor, aumentou. Possivelmente, esse fato está relacionado com a capacidade de isolamento do sensor, pois o efeito de condução aumenta a componente imaginária da constante dielétrica do sensor, aumentando sua capacitância. É possível, também, que as condições de salinidade do solo tenham contribuído para esse aumento.

Em princípio, foi pensado que o verniz isolante havia se decomposto em função da temperatura da estufa. Por isso, pensou-se em um material mais robusto: massa epóxi. Porém, foi observado, ao longo do trabalho, que o fato de a capacitância ter aumentado estava associado com outros fenômenos: as perdas capacitivas.

Tabela 4.4 - Permissividade relativa de alguns constituintes do solo

Material	Permissividade relativa
Ar	1
Água (20°C)	80
Gelo (-3°C)	3
Basalto	12
Granito	7 a 9
Silte seco	3,5
Areia seca	2,5

#### 4.3.2. Sensores com Hastes Recobertas com Massa Epóxi

Neste experimento foi utilizado o circuito de medição oscilador. Os dados do teor de água do solo em peso e do sinal de saída do circuito de medição estão representados na Tabela 4.5, para as três repetições.

As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 mostram a variação do teor de água, em peso, em função do sinal de saída do circuito de medição do sensor para as três repetições realizadas.

Tabela 4.5 – Teor de água do solo, em peso, e sinal de saída do circuito de medição

Repetição 1		Repetição 2		Repetição 2	
Teor de água (kg kg <sup>-1</sup> )	Sinal do sensor ( $\mu$ s)	Teor de água (kg kg <sup>-1</sup> )	Sinal do sensor ( $\mu$ s)	Teor de água (kg kg <sup>-1</sup> )	Sinal do sensor ( $\mu$ s)
0,233	83,2	0,261	70,4	0,271	84,8
0,230	89,6	0,256	74,4	0,266	88,8
0,221	98,4	0,248	76,0	0,257	96,8
0,216	100,8	0,243	77,6	0,252	99,2
0,210	109,6	0,238	82,4	0,247	103,2
0,196	120,8	0,221	86,4	0,231	112,8
0,169	151,2	0,192	100,0	0,199	136,8
0,141	164,8	0,164	106,4	0,170	164,8
0,113	227,2	0,132	125,6	0,138	204,8
0,088	214,4	0,107	130,4	0,111	204,8
0,063	176,0	0,080	127,2	0,088	166,4
0,062	190,4	0,078	128,8	0,086	171,2
0,051	152,8	0,066	124,0	0,074	154,4
0,039	179,2	0,055	138,4	0,061	147,2
0,030	179,2	0,043	163,2	0,051	137,6
0,025	105,6	0,037	123,2	0,045	104,0
0,019	56,0	0,030	120,0	0,038	80,0
0,015	36,8	0,024	79,2	0,034	51,2
0,012	28,0	0,019	47,2	0,029	38,4
0,008	24,8	0,015	33,6	0,026	31,2
0,000	18,4	0,000	20,0	0,000	20,0

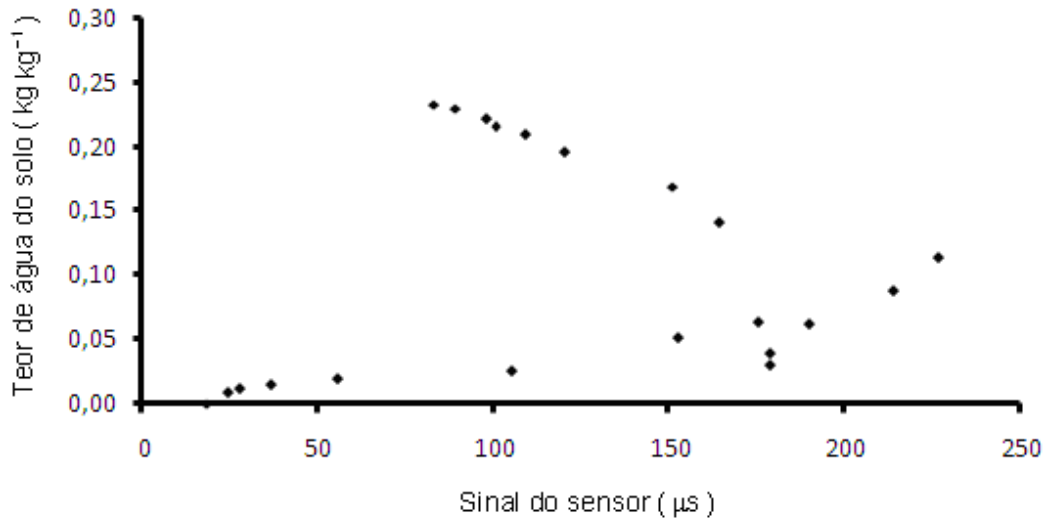


Figura 4.6 – Variação do teor de água, em peso, em função do sinal de saída do sensor (repetição 1).

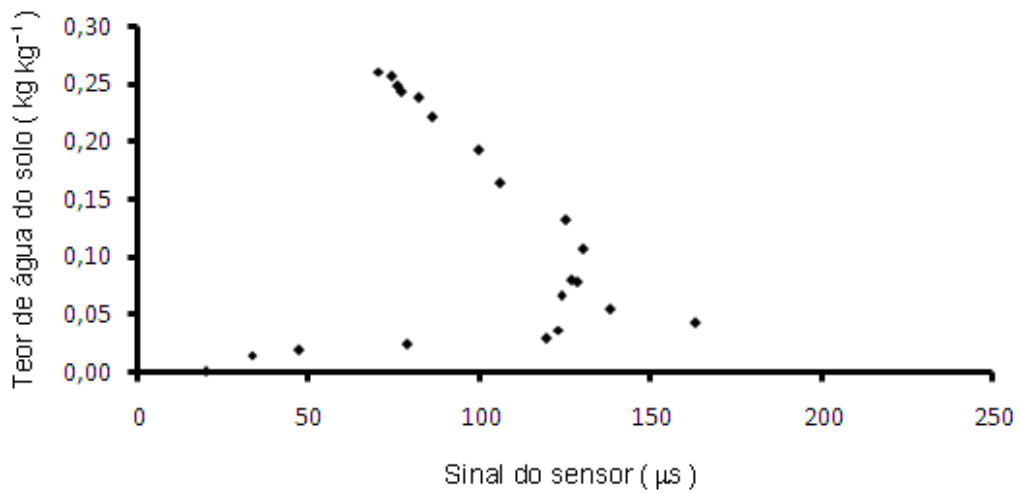


Figura 4.7 – Variação do teor de água, em peso, em função do sinal de saída do sensor (repetição 2).

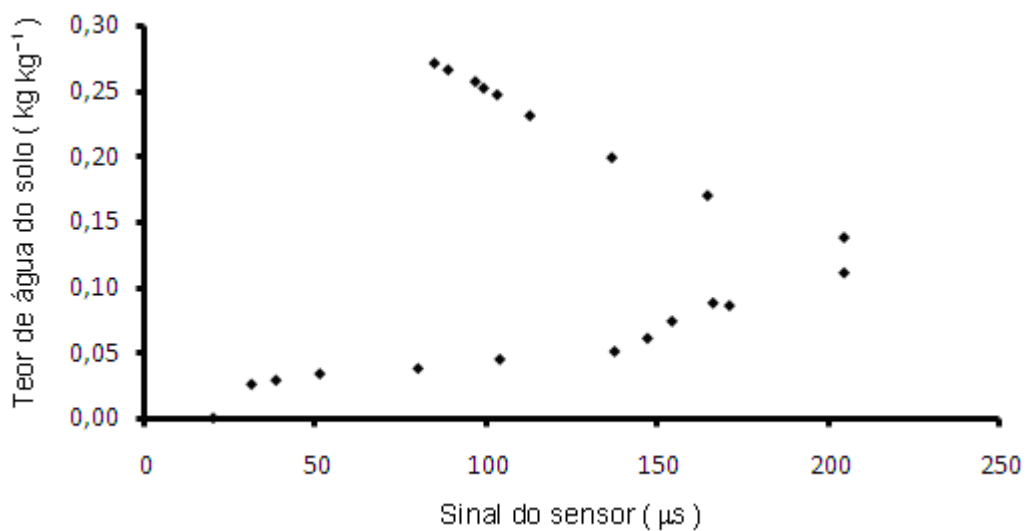


Figura 4.8 – Variação do teor de água, em peso, em função do sinal de saída do sensor (repetição 3).

Observou-se a mesma tendência na distribuição dos dados para as três repetições, com dois comportamentos distintos: para teores de água entre, aproximadamente, 0 e 14%, o sinal do sensor foi diretamente proporcional ao teor de água do solo; para teores de água entre, aproximadamente, 14 e 26%, o sinal do sensor foi inversamente proporcional ao teor de água do solo.

Esperava-se que o sinal do sensor fosse sempre diretamente proporcional ao teor de água do solo, pois a diminuição da quantidade de água no solo faria diminuir a capacitância do sensor. No entanto, no início do experimento, com teor de água do solo entre 14 e 26%, verificou-se o contrário.

Possivelmente, esse fato ocorreu devido ao aumento de perdas capacitivas relacionadas com o fenômeno de condução, visto que a capacidade de isolamento da massa epóxi foi menor do que  $1,0M\Omega$  em alguns momentos do experimento. No experimento utilizando sensores com hastes recobertas por verniz isolante, o aparelho utilizado não foi capaz de medir sua resistência de isolamento, significando que seu valor foi maior que  $40M\Omega$ .

No experimento utilizando sensores com hastes recobertas por verniz isolante também foi observado o aumento do sinal do sensor com a diminuição do teor de umidade do solo no início do experimento. No entanto, esta diminuição foi mais suave. Para comparar esse comportamento entre os dois sensores, seus sinais de saída foram normalizados entre 0 e 1, como indicado na Figura 4.9.

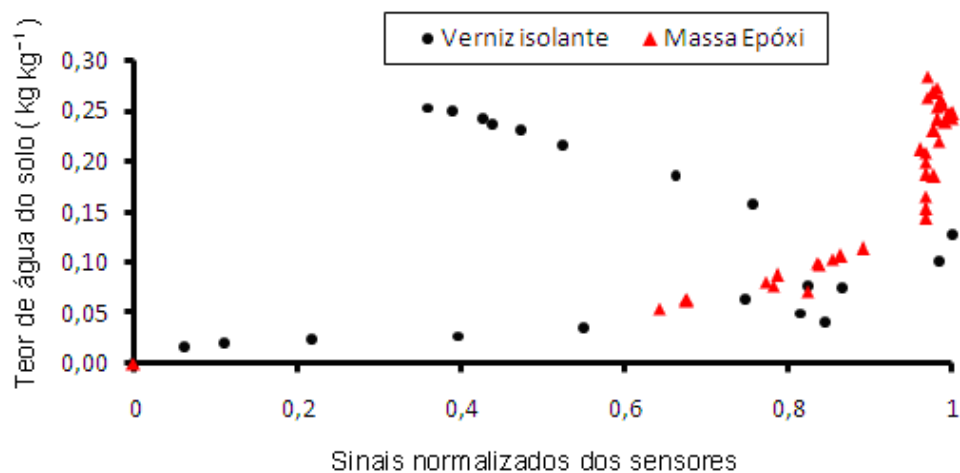


Figura 4.9 – Teor de água do solo em função do sinal normalizado dos sensores recobertos por verniz (em vermelho) e por massa epóxi (em preto).

Na Figura 4.9, observa-se certa semelhança nos dados para teores de água entre 0 e 15%, aproximadamente. No entanto, utilizando o sensor de hastes recobertas por massa epóxi, seria impossível estimar o teor de água do solo quando seu sinal (normalizado) for maior que, aproximadamente, 0,4. Neste caso, o mesmo sinal pode representar dois teores de água do solo muito distintos. Por exemplo, se o sinal normalizado de saída for 0,5, o teor de água poderia ser 5 ou 25%, aproximadamente. Portanto, em se tratando de controle do acionamento de irrigação, com esse sensor só poderia ser possível identificar ausência ou presença de água, praticamente. Por isso, não foi possível ajustar qualquer modelo matemático aos dados desse experimento.

Nesse experimento, além de medir o sinal de saída do circuito oscilador, para cada teor de água do solo, mediu-se também a capacitância do sensor com um multímetro. A Figura 4.10 mostra a correlação do sinal do circuito oscilador com a capacitância do sensor medida com o multímetro.

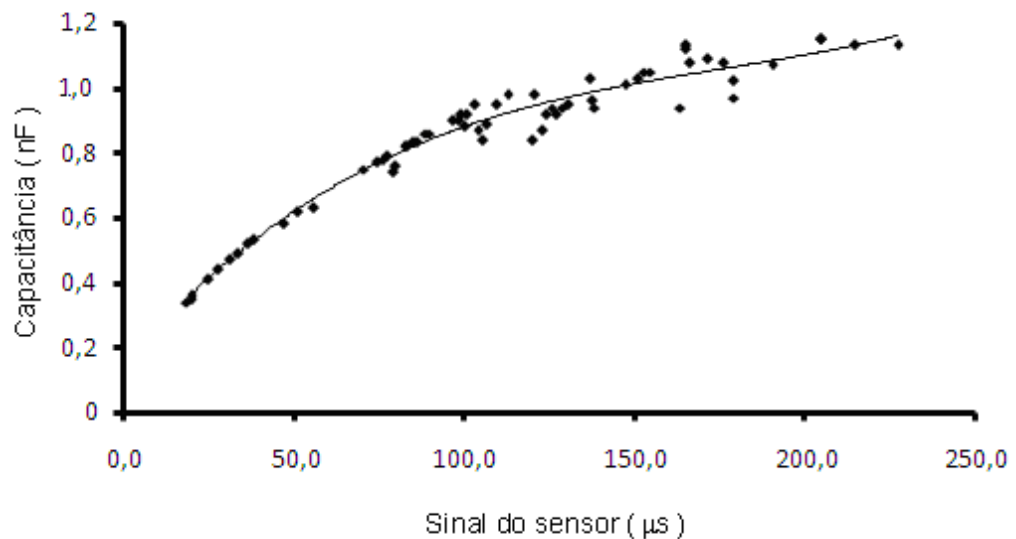


Figura 4.10 – Capacitância do sensor em função do sinal de saída do circuito oscilador.

O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais de capacitância em função do sinal de saída do sensor é expresso pela Equação 4.2.

$$y = Ax^3 + Bx + C \quad (4.2)$$

em que:

- y - capacitância do sensor, nF.
- x - sinal de saída do sensor,  $\mu\text{s}$ .
- A - coeficiente de regressão.
- B - coeficiente de regressão.
- C - coeficiente de regressão.

Os valores dos coeficientes A, B e C, bem como o valor do coeficiente de determinação,  $R^2$ , obtido para o modelo da Equação 4.2, encontram-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Valores dos coeficientes A, B e C e do coeficiente de determinação,  $R^2$ , obtidos para o modelo da Equação 4.2

A	B	C	$R^2$
$1 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-5}$	0,012	0,966

Observa-se que o modelo apresenta alto valor do coeficiente de determinação, indicando que o circuito de medição oscilador pode ser usado para estimar corretamente a capacitância do sensor em 96,6 % dos casos.

#### 4.4. PAINEL CONTROLADOR

Foram desenvolvidos dois protótipos do painel controlador. O primeiro foi desenvolvido com o intuito de verificar apenas sua funcionalidade, sem se preocupar com sua robustez ou aparência (Figura 4.11).

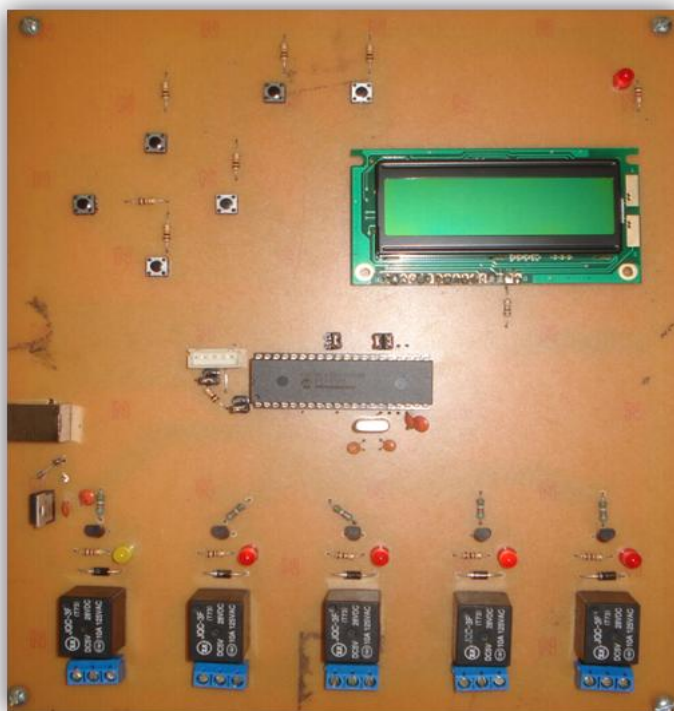


Figura 4.11 – Primeiro protótipo do painel controlador.

Depois de verificada a funcionalidade do primeiro protótipo, foi desenvolvido o segundo protótipo, de maneira mais elaborada. Nessa versão, foram construídas placas de circuito impresso individuais para as partes de controle e de potência; os relés eletromecânicos foram substituídos por relés de estado sólido; foram utilizados circuitos integrados optoacopladores para isolar eletricamente a parte de controle da parte de potência; o número de saídas foi aumentado de cinco para oito; a fonte de alimentação foi embutida no aparelho; o equipamento foi dimensionado e encapsulado dentro de uma caixa de plástico, proporcionando maior robustez e facilidade de operação (Figura 4.12).



Figura 4.12 – Segundo protótipo do painel controlador.

No primeiro protótipo, utilizou-se o *Timer 1* do microcontrolador como relógio de tempo real (*Real Time Clock – RTC*). Para isso, foi adicionado um cristal de 32.768 kHz no circuito. A contagem de segundos é realizada sempre que ocorre uma interrupção provocada pela ultrapassagem da capacidade do registrador do *Timer 1*.

No segundo protótipo, foi utilizado um circuito integrado de relógio de tempo real, que disponibiliza de forma serial informações sobre segundos, minutos, horas, dia da semana, dia do mês, mês e ano. Foi utilizada a comunicação entre circuitos integrados (*Inter-Integrated Circuit – I2C*) entre o microcontrolador e o circuito integrado de relógio em tempo real. Duas vantagens em relação ao relógio de tempo real do primeiro protótipo foram observadas: o programa do microcontrolador foi reduzido, pois a contagem de tempo é feita de forma independente pelo próprio circuito integrado de relógio em tempo real, evitando processamento com cálculos ou com tratamento de interrupção; esse circuito integrado possui bateria independente, o que evita o desajuste do seu relógio quando o equipamento for desligado da rede elétrica.

Os modos de operação do painel controlador são ajustados por meio de seus botões e são visualizados no seu mostrador de cristal líquido (Figura 4.13).

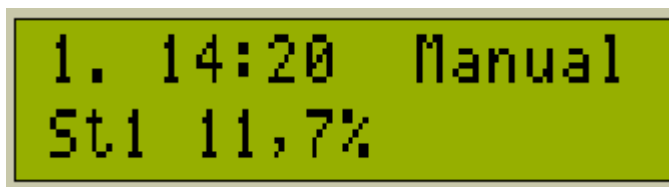


Figura 4.13 – Ilustração do mostrador de cristal líquido.

Na Figura 4.13, o dígito “1.” indica a página atual de configuração selecionada, “14:20” indica a hora atual, “Manual” indica o programa de operação selecionado, “St1” indica que o setor 1 está selecionado e “11,7%” indica o teor de água do solo médio do setor 1.

Para que o controlador passasse a indicar o teor de água do solo em peso, foi inserido em seu programa o modelo matemático encontrado na calibração do sensor.

No painel controlador, existem 6 botões de navegação e 8 diodos emissores de luz (LEDs) indicadores (Figura 4.14). Os dois botões da direita são utilizados para alterar a página de configuração atual. Os quatro botões de alteração de parâmetros (acima, abaixo, esquerdo e direito) servem para alterar os parâmetros de configuração.

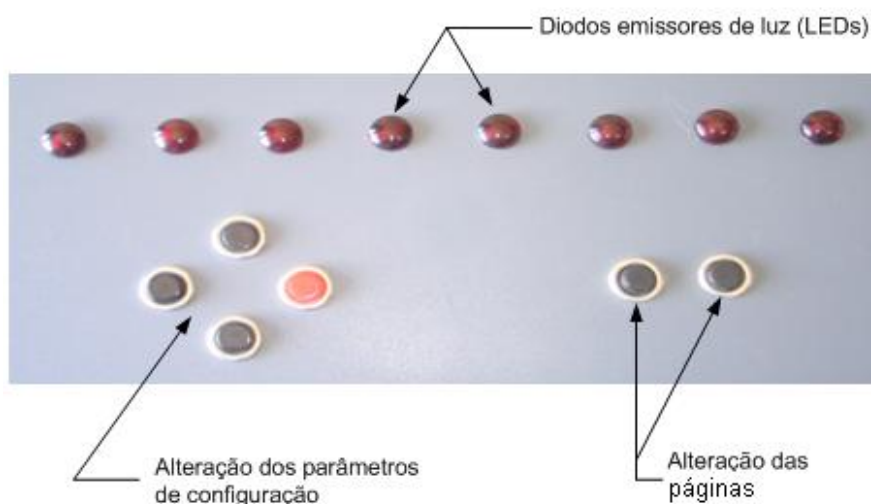


Figura 4.14 – Detalhe dos botões e dos LEDs do painel controlador.

Na página “1”, o botão vermelho (“direita”) serve para ligar e desligar o sistema de irrigação. Os botões “acima” e “abaixo” servem para mudar de setor. O botão “esquerdo” serve para selecionar o modo de operação: “Manual”, “Timer”, “Automático” ou “Smart”.

Na página “2”, os botões “cima” e “baixo” servem para aumentar ou diminuir os valores de hora e minuto. Os botões, “esquerdo” e “direito”, servem para selecionar qual parâmetro será ajustado: hora ou minuto (Figura 4.15).



Figura 4.15 – Página 2: ajuste do relógio do painel controlador.

Na página três é possível ajustar o tempo de funcionamento de cada setor (Figura 4.16).



Figura 4.16 – Página 3: ajuste do tempo de funcionamento dos setores.

O tempo de funcionamento de cada setor é visualizado na página “1” quando o modo de operação selecionado for “Timer”, “Auto” ou “Smart”, indicando o tempo restante de funcionamento do setor atual, de forma decrescente (Figura 4.17).

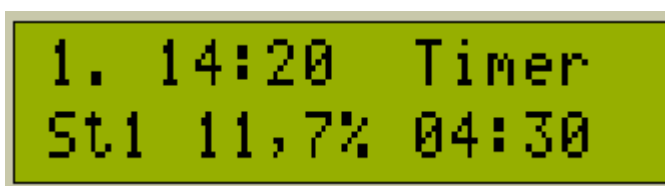


Figura 4.17 – Detalhe do tempo restante de funcionamento de cada setor.

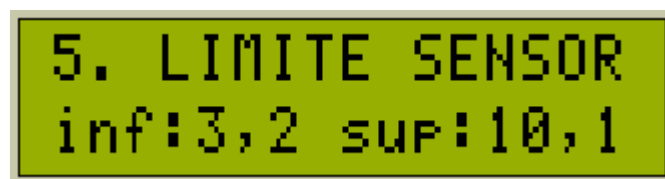
A página “4” é destinada ao ajuste da hora na qual o sistema deve iniciar sua operação (Figura 4.18).



4. HORA DE LIGAR  
18:00h

Figura 4.18 – Página 4: ajuste da hora de iniciar a operação do sistema.

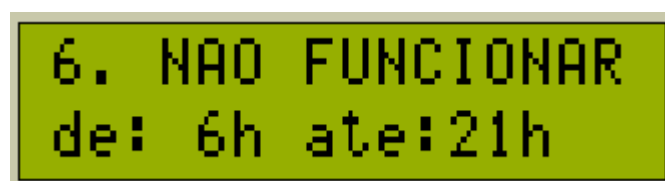
Na página “5”, podem ser ajustados os parâmetros *limite inferior* e *limite superior* (Figura 4.19). Portanto, pode-se escolher, por exemplo, que o sistema de irrigação seja ligado, quando o teor de água do solo for menor do que 3,2%, e desligado quando o teor de água aumentar acima de 10,1%.



5. LIMITE SENSOR  
inf:3,2 sup:10,1

Figura 4.19 – Página 5: ajuste dos parâmetros *limite superior* e *limite inferior*.

Na página “6”, pode-se definir uma faixa de horário na qual o sistema não deve entrar em funcionamento. Esse parâmetro só tem função no modo de operação “Smart” (Figura 4.20).



6. NAO FUNCIONAR  
de: 6h ate:21h

Figura 4.20 – Página 6: configuração de horário de exclusão de funcionamento do sistema.

Na página “7”, podem ser definidos os dias da semana em que o sistema deve entrar em funcionamento (Figura 4.21).

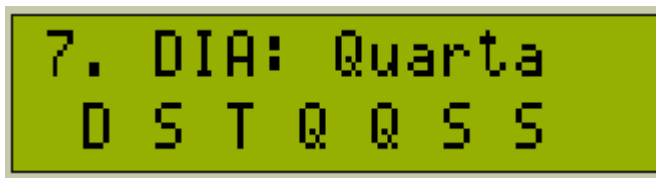


Figura 4.21 – Página 7: configuração dos dias de funcionamento do sistema.

Na continuação desse trabalho, pretende-se acrescentar ao programa do microcontrolador páginas de seleção do tipo de solo ou de ajuste de parâmetros do modelo utilizado para estimar o teor de água do solo.

#### 4.5. REDE SEM FIO

O circuito desenvolvido para realizar a transmissão de dados foi dimensionado para ser encapsulado em uma caixa de plástico de 7,5×5,5×2,5 cm, de modo que apenas sua antena ficasse do lado de fora (Figura 4.22).



Figura 4.22 – Módulos de transmissão de dados.

Foi realizado um teste de transmissão com os módulos distantes de 1,6 km, em visada direta. Não foi observada qualquer falha na transmissão dos dados.

Na continuação desse trabalho, pretende-se explorar o modo econômico de energia (*Sleep*) dos módulos de transmissão e do microcontrolador do

circuito de medição, a fim de que cada sensor seja alimentado por meio de pilha ou bateria.

Quando o projeto passar para a etapa de campo, as caixas de plástico dos módulos de transmissão serão impermeabilizadas com silicone.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho pode-se chegar às seguintes conclusões:

1. Foi possível desenvolver o sensor do teor de água do solo e o sistema de controle e automação em malha fechada para manejo de irrigação.
2. O sensor com hastes recobertas por verniz isolante e seu circuito de medição podem ser utilizados para medir o teor de água do solo com precisão satisfatória.
3. O verniz isolante apresentou maior poder de isolamento do que a massa epóxi.
4. O aumento da temperatura causa aumento nas perdas capacitivas do sensor, aumentando sua capacitância. Portanto, quanto maior o poder de isolamento do material utilizado para recobrir as hastes do sensor, menor será o efeito da temperatura sobre suas medições.
5. Todas as funções implementadas para o painel controlador funcionaram corretamente.
6. A rede de transmissão de dados sem fio implementada funcionou corretamente até uma distância de 1,6km entre transmissores, em visada direta.

## **6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Obter modelos confiáveis para estimar o teor de água para outros tipos de solo.

Avaliar o poder de isolamento do material utilizado para recobrir as hastes dos sensores utilizando um instrumento com maior precisão.

Testar outros tipos de material isolante.

Realizar procedimento de calibração utilizando os dois circuitos de medição: em ponte de corrente alterna e oscilador. Em seguida, verificar qual deles é mais eficiente na estimativa do teor de água do solo.

Encontrar frequência máxima para o circuito de medição que não comprometa seu funcionamento. Em seguida, avaliar o quanto o aumento da frequência diminui o efeito das perdas capacitivas.

Incluir no sensor um medidor de resistência elétrica do solo e um sensor de temperatura, e correlacionar esses parâmetros com o efeito das perdas capacitivas.

Explorar a capacidade de economia de energia dos microcontroladores e dos módulos de transmissão sem-fio para aumentar seu tempo de funcionamento em campo, pois eles serão alimentados por pilha ou bateria.

Implementar sistema de detecção da condição de carga da bateria para sua eventual substituição.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**, 8ª Ed., Viçosa: Editora UFV, 2006. 625 p. ISBN 85-7269-242-8.

BOLTON, W. **Instrumentação & Controle**. Tradução de Luiz Roberto de Godói Vidal. Curitiba: Ed. Hemus, 2002.

BORIM, A. C. A.; PINTO, C. A. R. Medição de Umidade no Solo através de Sensores Capacitivos. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**. Valinhos, v. 1, n. 1, 2006. ISSN 1980-1793. Disponível em: <<http://www.unianhanguera.edu.br/programasinst/publicacoes.php>>. Acesso em: 11 nov., 2007.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos, 8ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004, p. 531-533.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F., McCONNELL, K. G. **Instrumentation for Engineering Measurements**. 2. ed., Hoboken, United States of America: John Wiley & Sons Inc., 1993. ISBN 0-471-55192-9.

DOEBELIN, E. O. **Measurement systems: application and design**. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1990.

EDMINISTER, J. A. **Circuitos Elétricos**. São Paulo: Ed, McGraw-Hill, 1985.

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

GARCÍA, M. A. P.; ANTÓN, J. C. A.; RODRÍGUEZ, J. C. C.; MARTÍN, F. J. F.; ORTEGA, G. J. G. **Instrumentación Electrónica**. Madrid: Ed. Thomson, 2004.

GOMIDE, R. L. **Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos**, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. Anais,, Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998, Cap.2, p.133-238.

GOMIDE, R. L. **Monitoramento automático de fluxo de seiva com sondas de balanço de energia e caracterização de estresse hídrico de duas linhagens de milho (Zea mays L.)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, 2002, Salvador. Anais,, Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002, 1 CD-ROM.

HAYT Jr., W. H. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos Ltda., 1983.

KERCHNER, R. M.; CORCORAN, G. F. **Circuitos de Corrente Alternada**. Porto Alegre: Ed. Globo, 1973.

KUPHALDT, T. R. **Lessons in Electric Circuits**. Open Book Project, 2007. Disponível em: <<http://www.allaboutcircuits.com>>. Acesso em: 15 jun., 2008.

LACERDA, R. D.; GUERRA, H. O. C.; JUNIOR, G. B.; CAVALCANTI, M. L. F. **Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo.** Revista de Biologia e Ciências da Terra, Campina Grande, v.5, n.1, 2005. ISSN 1519-5228.

LEGUENZA, E. L.; ROBERT, R.; GIACOMETTI, J. A. Comportamento da permissividade elétrica com a temperatura. **Revista da Vinci**, Curitiba, v.2, n.1, p. 105-116, 2005.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos.** 2ª, Ed., Viçosa: Editora UFV, 2007. 358p.

OGATA, K. **Modern Control Engineering.** 3<sup>rd</sup> ed., Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997.

OLLITA, A. F. L. **Os Métodos de Irrigação.** 1ª. Ed., São Paulo: Editora Nobel, 1983.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* [online], 2000, vol.4, n.3, pp. 465-473. ISSN , doi: 10.1590/S1415-43662000000300025.

PEREIRA, S. **Tecnologia da Reflectometria no Domínio do Tempo para Medição da Umidade do Solo.** 87 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC: Técnicas Avançadas.** 7ª. Ed., São Paulo: Editora Érica, 2007.

SALMAZO, L. O.; ALVES, W.; NOBRE, M. A. L. **Materiais Dielétricos – Correlação: Propriedades e Defeitos.** Apostila. Universidade Federal Paulista, Departamento de Física, Química e Biologia, Presidente Prudente, 2006. Disponível em: <<http://www.prudente.unesp.br>>. Acessado em: 22/01/2010.

SILVA, I. O. **Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo.** 86 f, Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SOUZA, D. J. **Desbravando o PIC: ampliado e atualizado para PIC 16F628A.** 12. Ed, São Paulo: Ed. Érica, 2009. ISBN 85-7194-867-4.

XBEE/XBEE- PRO. **OEM RF Modules.** Digi International Inc., 2008. Disponível em: <<http://www.digi.com>>.

**THE MICROCHIP. PIC16F877A.** Solarbotics Ltda., 2008. Disponível em: <<http://www.solarbotics.com/products/pic16f877a/>>. Acesso em 18 jun. 2008.

ZANCO, W. S. **Microcontroladores PIC 16F628A/648A: uma abordagem prática e objetiva.** 1. Ed. São Paulo: Ed. Érica, 2005.