Wellington Roque

Desenvolvimento de um multi-sensor eletrônico para medida da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo.

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

Campinas, SP 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

R685d	 Roque, Wellington Desenvolvimento de um multi-sensor eletrônico para medida da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo. / Wellington Roque. – Campinas, SP: [s.n.], 2008.
	Orientador: José Antonio Siqueira Dias. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,
	Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
	1. Sensores. 2. Solos - Umidade. 3. Condutividade elétrica.
	4. Condutividade térmica. 5. Agricultura de precisão.
	I. Dias, José Antonio Siqueira. II. Universidade Estadual de Campinas.
	Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês:	Development of an eletronic multi-sensor for measuring the humidity,
	temperature and electric conductivity of the soil.
Palavras-chave em Inglês:	Sensors, Precision agriculture, Electrical conductivity,
	Thermal conductivity, Soil moisture.
Área de concentração:	Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.
Titulação:	Mestre em Engenharia Elétrica.
Banca Examinadora:	Ariovaldo Luchiari Júnior e Elnatan Chagas Ferreira.
Data da defesa:	24/07/2008
Programa de Pós-Graduação:	Faculdade de Engenharia Elétrica.

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Wellington Roque

Data da Defesa: 24 de julho de 2008

Título da Tese: "Desenvolvimento de um Multi-Sensor Eletrônico para Medida da Umidade, Temperatura e Condutividade Elétrica do Solo"

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias (Presidente): uchia 104 Dr. Ariovaldo Luchiari Júnior: _ Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira:

Resumo

A utilização de sensores é indispensável para a coleta de dados na Agricultura de Precisão, pois possibilita um estudo mais aprofundado e preciso do solo. A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um multi-sensor (MS) para realizar a medida do valor da condutividade elétrica do solo usando um dispositivo composto por quatro hastes paralelas tipo "Wenner array", e aproveitando a sua geometria de fabricação, realizar a medida da umidade volumétrica do solo por intermédio de um método indireto, que usa a variação da condutividade térmica do solo em função da quantidade de água nele presente. Foi também desenvolvido um sistema de medida e aquisição de dados que permite a caracterização e a calibração de sensores de umidade através de um programa em LabView e uma placa de aquisição de dados, desenvolvida a partir de uma célula de carga. Os resultados obtidos mostram que o medidor de quatro pontas tipo "Wenner array" é uma ferramenta útil e precisa para medida da condutividade elétrica do solo e a técnica de medir as variações da temperatura no solo causadas por pulsos de calor fornece dados úteis para estimar, com precisão necessária para usos agrícolas, a umidade do solo.

Palavras-chave: Sensores, agricultura de precisão, condutividade elétrica do solo, condutividade térmica do solo, umidade do solo.

Abstract

The implementation of precision agriculture techniques requires the use of sensors which can measure the characteristics of the soil. In this work it was designed and fabricated a multi-sensor probe, capable of measuring the electrical conductivity, the volumetric humidity, and the temperature of the soil, using a four probes device. The electrical conductivity of the soil is measured using the conventional Wenner array method, where a self-calibration circuit was designed to avoid the usually necessary initial calibration of the Wenner array. The volumetric humidity is obtained by an indirect measurement, where the thermal conductivity of the soil is evaluated by applying heat pulses in one probe of the sensor, and measuring the resulting temperature increase in an adjacent probe. It was also developed an automatic measurement and data acquisition system that allows the characterization and calibration of the sensors. The obtained results show that the Wenner array is an useful tool for measuring the electric conductivity of the soil, and that the evaluation of the thermal conductivity of the soil using heat pulses and measuring the variation of temperature can accurately determine the humidity of the soil.

Keywords: Sensors, precision agriculture, electrical conductivity, thermal conductivity, soil moisture.

Agradecimentos

Ao professor Dr. José Antonio Siqueira Dias pela orientação, amizade e principalmente pela paciência dedicada a mim.

Ao professor Dr. Elnatan Chagas Ferreira, por me apoiar e confiar quando eu mais precisei.

Ao professor Dr. Edson Eiji Matsura pela oportunidade e confiança em meu trabalho.

À Faculdade de Engenharia Elétrica - Unicamp, pela oportunidade da realização do curso.

À CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de estudo.

Aos amigos de sala Rafael, Alcino, Fábio Flosi, Rodrigo, Anderson, Anderson Wedderhoff, Paulo Soares e ao argentino Hugo Bertone, pelas sugestões e contribuições para realização deste trabalho e principalmente pelo convívio e amizade durante o tempo de mestrado.

Ao amigo Felipe pela imprescindível ajuda na realização deste trabalho.

Aos amigos da Feagri Anderson, Douglas, Laura, Túlio, Marcelo e Gelson pelo tempo que convivemos juntos e na contribuição para o meu aprendizado.

A secretária Ester pelo carinho e dedicação.

A todos aqueles que não foram citados, mas que colaboraram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, José e Luzia, pelo carinho e dedicação, que tiveram sempre estando ao meu lado, em todos momentos de minha vida, Ao meu irmão, pela humildade, perseverança e conhecimento dedicados a mim, A minha namorada Ana Elisa por ser sempre tão compreensiva e companheira, A toda minha família, Aos meus amigos.

Sumário

Li	Lista de Figuras			ix		
Gl	Glossário					
1	Intr	odução		1		
2	Revisão de Literatura					
	2.1	Agricu	Iltura de Precisão e Irrigação Inteligente	3		
		2.1.1	Manejo da Irrigação	4		
		2.1.2	Estudo da dinâmica da água e de solutos no solo	5		
		2.1.3	Variabilidade Espacial e Temporal	7		
		2.1.4	Automação	8		
	2.2	Sensor	es e métodos de medida dos atributos do solo	9		
		2.2.1	Método capacitivo	10		
		2.2.2	Blocos Porosos	10		
		2.2.3	Sonda de nêutrons	11		
		2.2.4	Reflectometria no domínio do tempo	12		
		2.2.5	Temperatura no solo	13		
		2.2.6	Umidade no Solo	14		
		2.2.7	Condutividade Elétrica no Solo	14		
3	Proj	eto e de	esenvolvimento dos sensores	16		
	3.1	Métod	o do "Wenner Array" (Quatro Pontas)	17		
	3.2	Métod	o de dissipação de calor	19		
	3.3	Projeto	o dos circuitos eletrônicos	19		
4	Resi	ultados	e Discussões	26		
	4.1	Calibra	ação do Sensor	26		
	4.2	Desenv	volvimento dos programas	30		
	4.3	Anális	e dos resultados medidos utilizando o "Wenner Array"	31		
	4.4	Anális	e dos resultados medidos utilizando o método da dissipação de calor	33		
5	Con	clusões		40		
	5.1	Conclu	1sões	40		

Referências bibliográficas

viii

Lista de Figuras

2.1	Visão de uma área irrigada por pivô-central.	4
2.2	Manejo de irrigação utilizando tensiômetro.	5
2.3	Esquema para a coleta de solução na coluna de solo	6
2.4	Esquema de um Multiplexador	7
2.5	Exemplo de pontos de amostragem em uma área de 1Km^2	8
2.6	Sistema de irrigação automático	9
2.7	Método Capacitivo	10
2.8	Sensor de bloco poroso que utiliza o método da resistência elétrica e da dissipação de	
	calor	11
2.9	Sonda de Nêutrons.	12
2.10	Fabricação de uma sonda de TDR	13
2.11	Sensor de dissipação de calor.	15
31	Diagrama do encajo experimental	16
3.1	Diagrama do medidor de quatro pontas	17
3.2	Arranio "Wenner Alpha" comumente usado em estudos de resistividade e seus res-	17
5.5	nectivos fatores geométricos	18
34	Princípio de operação do circuito gerador de onda triangular	$\frac{10}{20}$
3 5	Diagrama básico do circuito gerador de onda triangular	21
3.6	Circuito da chave de corrente e comparador com histerese do gerador de onda triangular.	21
3.7	Circuito do conversor triangular-senoidal.	22
3.8	Circuito dos dois amplificadores diferenciais usados para medir V_{cal} e V_{med}	24
3.9	Circuito da parte analógica do sensor de quatro pontas	25
3.10	Figura do sensor de quatro pontas	25
4.1	Calibração do "Wenner Array": medida de I/V para diferentes valores de concentra-	
	ções em soluções de KCl	27
4.2	Valor do erro em percentual da medida da condutividade elétrica usando o MS, assu-	
	mindo uma curva de calibração dada por uma reta.	27
4.3	Esquema da aquisição da umidade do solo usando uma célula de carga	28
4.4		29
4.5	Sinal da amplitude da corrente e da tensão medidas pelo osciloscópio	30
4.6	Interface do programa em LabView	31
4.7	Valores medidos da resistência em função da umidade volumêtrica	32

4.8	Valores medidos de I/V em função da umidade volumétrica	32
4.9	Valor da umidade volumétrica em função da ce no solo	33
4.10	Variação de I/V e de ΔT em função da umidade volumétrica $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	34
4.11	Avaliação do pico da ΔT para 33% de umidade volumétrica no solo	35
4.12	Avaliação do pico da ΔT para 18% de umidade volumétrica no solo	35
4.13	Avaliação do pico da ΔT para 5% de umidade volumétrica no solo	36
4.14	Avaliação do pico da ΔT para solo saturado	36
4.15	Avaliação do pico da ΔT para solo úmido	37
4.16	Avaliação do pico da ΔT para solo seco	37
4.17	Avaliação do pico da ΔT para diferentes tipos de umidade	38
4.18	Valor medido de ΔT em função da umidade volumétrica do solo	38

Glossário

- MS Multi-sensor
- TDR Reflectometria no Domínio do Tempo Time Domain Reflectometry

Capítulo 1 Introdução

A busca na elevação da produção de alimentos, com ganhos de qualidade e produtividade, que viabiliza aos produtores resultados econômicos maiores, justifica a importância da utilização de equipamentos e produtos de irrigação mais eficientes. Uma alternativa que o agricultor tem para não correr riscos de perda de produção em épocas de falta de chuva, é a utilização de sistemas de irrigação.

Porém, devido a má utilização destes sistemas, a irrigação tem sido apontada ao longo das últimas décadas, como uma grande consumidora de água. Com a expansão do uso da irrigação, o recurso água tende a se tornar cada vez menor, sendo necessário que os sistemas operem com altos níveis de eficiência, minimizando as perdas.

Uma prática conhecida como manejo de irrigação vem sendo empregada em trabalhos como o apresentado na Ref. [1] que visa adotar critérios para aplicação de água que indique o momento e a quantidade de água para cada irrigação, suprindo assim as necessidades hídricas das plantas e garantindo desta forma o uso racional da água e energia.

Vários equipamentos vêm sendo desenvolvidos e outros utilizados para determinar as propriedades do solo baseado em dados de sensores, destacando-se entre eles: o método capacitivo, blocos porosos, método de dissipação térmica, método "Wenner array", a técnica da reflectometria no domínio no tempo (TDR), tensiômetros e as sondas de nêutrons.

Pesquisas na área de estudo da dinâmica de água e solutos [2] utilizam-se das medidas desses sensores para obter dados como a umidade e condutividade elétrica do solo para serem utilizadas em modelos matemáticos para simulação do movimento da água e soluto no solo.

No caso de estudos de variabilidade espacial [3], onde se trabalha com muitos pontos amostrais, a utilização de sensores de umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo espalhados na área facilita o estudo do solo em questão, garantem a repetibilidade e a aquisição destas medidas quantas vezes forem necessárias de forma rápida e confiável. Com o uso de recursos de estudos em microeletrônica, buscam-se alternativas para o desenvolvimento de sensores visando a aquisição, a transferência e o armazenamento de dados envolvidos nas necessidades física, hídricas e químicas das plantas.

Alguns desses sensores ainda encontram muitas limitações para serem utilizados diretamente no campo, como o custo do próprio sensor e também do equipamento utilizado para realizar a aquisição dos dados, o uso de cabos conectados em "datallogers" e multiplexadores para serem realizadas a aquisição e armazenamento dos dados, e ainda o problema da alimentação dos sensores no campo.

Tendo em vista a ampla utilização dos dados que envolvem as propriedades do solo como a umi-

dade volumétrica, condutividade elétrica e temperatura do solo, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e calibração de um multi-sensor (MS) de baixo custo que disponibilize esses dados de forma barata, eliminando com isso o uso de equipamentos de aquisições de dados que em grande maioria são importados e de custo elevado.

Capítulo 2

Revisão de Literatura

2.1 Agricultura de Precisão e Irrigação Inteligente

A incorporação da tecnologia da informação na produção e práticas agrícola começou no início da década de 80, e recentemente tem aumentado sensivelmente. Apesar desta tecnologia não ser nova, tem-se experimentado uma quantidade de informações disponíveis e uma variedade de informações muito maior do que se imaginava no inicio do processo. Esta aplicação de tecnologias na agricultura tem se identificado pelo termo, "Agricultura de Precisão" [4]. Varias são as definições para o termo agricultura de precisão, [5], define da seguinte forma "um conjunto de técnicas que permite o gerenciamento localizado das culturas", ou "uma estratégia de gerenciamento que se utiliza da tecnologia da informação para coletar dados de múltiplas fontes, afim de auxiliarem nas decisões relacionadas a plantação".

A Agricultura de Precisão consiste de um ciclo de análise da produtividade do solo através da colheita, análise das características do solo através de coleta de amostras ou imagens de satélite, controle preciso da aplicação de insumos, correção da terra e controle preciso da plantação e da aplicação de agrotóxicos e fertilizantes. As vantagens de sua aplicação são a economia de insumos agrícolas, agrotóxicos, fertilizantes , aumento da produtividade devido a otimização dos recursos do solo e sustentabilidade da terra em longo prazo, explorando-a de forma otimizada e não depredadora. Estas vantagens são comprovadas no campo científico e prático [6].

A Fig. 2.1, mostra uma extensa área de terra irrigada por um pivô-central, mostrando a necessidade de um estudo aprofundado utilizando as técnicas da Agricultura de Precisão e Irrigação Inteligente, garantindo todas as vantagens que a utilização de um sistema de irrigação pode trazer.

Os sistemas agrícolas irrigados têm sido os principais pontos de interesse no que diz respeito ao controle e a sistematização de coleta e uso de dados e informações, visando o melhor gerenciamento dos mesmos. Para isso é inevitável a utilização de tecnologia envolvendo a instrumentação e automação. O interesse principal deste gerenciamento é a correta programação da irrigação, onde se busca o fornecimento de uma quantidade adequada de água às plantas para prevenir o estresse hídrico que pode afetar, tanto em quantidade como em qualidade, a produção das culturas. A quantidade de água requerida em cada irrigação e o momento de aplicação dessa água são parâmetros governados pelas condições climáticas local, tipo de cultura e seu grau de crescimento, profundidade efetiva do sistema radicular e disponibilidade de água do solo.

A "Irrigação Inteligente" necessita, obrigatoriamente, do registro dos dados obtidos em campo



Fig. 2.1: Visão de uma área irrigada por pivô-central.

de forma automática inseridos num controle conhecido como malha fechada, envolvendo o uso de técnicas de microprocessamento, dispositivos eletrônicos, sensores e atuadores [7].

Para se determinar a quantidade de água de forma precisa faz-se necessário o uso de sensores para medições, em tempo real, de atributos ligados ao solo, planta e atmosfera. Esses sensores são imprescindíveis na automação de sistemas agrícolas irrigados e, conseqüentemente, na Irrigação Inteligente, porque fornecem medidas que serão usadas na determinação da necessidade hídrica das culturas e no estabelecimento de estratégias de manejo de irrigação, visando otimizar e racionalizar a utilização da água e da energia, assegurando melhoria de produtividade das culturas, lucratividade e competitividade dos produtos. Além da condução de pesquisas que visem o aprimoramento dos sistemas agrícolas irrigados, é também fundamental que os resultados obtidos sejam disponibilizados para uso em pesquisas, assistência técnica, produtores, iniciativa privada, etc. Dentro dessa visão, a disponibilidade de medidas de parâmetros do solo bem estruturados e de fácil acesso é tão importante quanto a obtenção desses dados [8].

2.1.1 Manejo da Irrigação

Mundialmente, a irrigação corresponde a 73% do consumo de água, 21% vai para a indústria e apenas 6% destina-se ao consumo doméstico [9]. A baixa eficiência e uniformidade dos sistemas de irrigação, e a limitada lixiviação de sais do solo estão dentre os principais fatores que influem na degradação do solo.

A adoção de técnicas racionais de manejo conservacionista do solo e da água é de fundamental importância para a sustentabilidade, de tal forma que se possa, economicamente, manter ao longo do tempo esses recursos com quantidade e qualidade suficientes para a manutenção de níveis satisfatórios de produtividade .

O conhecimento da quantidade de água requerida pelas culturas é importante na agricultura irrigada para que haja um adequado manejo de irrigação. Existem várias metodologias e critérios para estabelecer o manejo de irrigação, que vão desde simples turno de rega a completos esquemas de integração solo-água-planta-atmosfera, adotando critérios de aplicação de água que indiquem o momento e a quantidade de água para cada irrigação, suprindo assim as necessidades hídricas das plantas e garantindo desta forma o uso racional da água, energia e insumos agrícolas, obtendo alta produtividade com menor impacto ambiental [10].

A Fig. 2.2 mostra a utilização de tensiômetros em diferentes profundidades para determinar a umidade do solo no sistema radicular da planta e abaixo, para verificar o quanto está sendo eficiente o manejo da irrigação, também pode-se observar a leitura do potencial matricial no solo realizado em um dos tensiômetros.



Fig. 2.2: Manejo de irrigação utilizando tensiômetro.

Embora seja uma técnica que visa ao aumento da produtividade das culturas, em especial em regiões áridas e semi-áridas, a irrigação apresenta grande impacto nas disponibilidades hídricas dos mananciais de água, uma vez que grandes demandas de água são alocadas para os sistemas de irrigação, sobretudo em regiões onde se verificam altas concentrações de áreas irrigadas, principalmente em épocas de escassez de chuva.

A realidade da agricultura irrigada brasileira, no entanto, tem demonstrado que não é raro encontrarse projetos de irrigação, públicos ou privados, sem o apropriado planejamento e que, após implantados, são conduzidos sem a preocupação com o manejo e operações adequadas, resultando em baixa eficiência e comprometendo a expectativa de aumento da produtividade [11].

Para um correto manejo de irrigação são necessários transdutores precisos que forneçam dados como umidade, temperatura e evapotranspiração, além de outros.

2.1.2 Estudo da dinâmica da água e de solutos no solo

De maneira geral, a avaliação da dinâmica de água e solutos em colunas de solo é feita mediante a extração de amostras de solo e posteriores quantificações das respectivas umidades gravimétricas e das concentrações dos íons de interesse, mediante o uso da técnica da pasta saturada. Esta técnica destrutiva não admite fazer mais de uma amostra de um mesmo ponto, inviabilizando a avaliação da dinâmica de água e solutos ao longo da coluna de maneira continua.

Por meio de observações de infiltração de solução em colunas de areia homogênea em condições de saturação, após uma série de experimentos, Henry Darcy, formulou a chamada "Lei de Darcy", dada pela Eq. 2.1, na qual, a água em estado líquido move-se pela existência de um gradiente de potencial nos diferentes pontos de um sistema, no sentido do maior para o menor potencial [12].

$$q = -K_0(\frac{\partial \Phi t}{\partial z}) \tag{2.1}$$

em que:

q = vetor de densidade de fluxo de água no solo, L. T⁻¹; $K_0 =$ condutividade hidráulica do solo saturado, L. T⁻¹; $\partial \Phi t / \partial z =$ gradiente do potencial total da solução na direção vertical, adimensional.

O fluxo no solo pode ser descrito pela "Lei de Darcy", porém, essa descrição não é o suficiente para a consideração do movimento de solutos no solo, devido a uma série de outros fatores que devem ser analisados. A aproximação tradicional do movimento de água e soluto consiste em considerar o solo como uma unidade homogênea e daí aplicar a situações de campo os resultados obtidos e validados em colunas em laboratório.

Tendo em vista o grande numero de variáveis que envolvem e dificultam a avaliação de um sistema que se deseja monitorar no que diz respeito no transporte de solutos no solo em diferentes situações, a utilização de modelos torna-se desejável pela rapidez, precisão dos resultados obtidos e por permitir que um grande número de fatores e efeitos sejam contabilizados.

A Fig. 2.3 mostra um ensaio realizado em uma coluna de solo utilizando sondas de TDR e o uso de multiplexador para realizar a medida da umidade e condutividade elétrica no solo de forma automática, a coluna ainda possui orifícios para retirada do solo para análise utilizando a técnica da pasta saturada e o uso de extratores para retirada da agua para avaliar a quantidade de íons presente na amostra.



Fig. 2.3: Esquema para a coleta de solução na coluna de solo.

Devido às dificuldades inerentes ao estudo experimental da dinâmica de água e de solutos no solo, em condições de campo, a condução destes estudos em laboratório ou em ambientes protegidos, utilizando-se colunas preenchidas com terra fina seca ao ar é uma prática bastante utilizada atualmente. Tal procedimento permite que a dinâmica da água e de solutos seja avaliada em uma condição controlada, permitindo um melhor entendimento destes processos.

A calibração de equações que relacionem, para cada tipo de solo, a condutividade elétrica com a concentração de solutos no solo vem sendo o objetivo de muitos trabalhos para a avaliação do movimento de solutos no solo, como é o caso de [2].

2.1.3 Variabilidade Espacial e Temporal

Antes da revolução industrial e do processo de mecanização da agricultura, os agricultores já eram capazes de reconhecer a variabilidade especial de certas características físico-químicas e biológicas das áreas cultivadas. A própria divisão destas áreas em campos reflete o conhecimento desta variabilidade. Até então, o uso do trabalho braçal ou de tração animal permitia aos agricultores tratar áreas com menor ou maior fertilidade ou infestação por pragas e doenças de forma diferenciada . Com o advento da mecanização e da produção em larga escala, os campos cultivados passaram a ser tratados de maneira uniforme. A quantidade de aplicação de fertilizantes passaram a ser calculadas com base em valores médios de fertilidade e a aplicação feita uniformemente em toda a extensão do campo.

Como resultado, áreas com maior nível de fertilidade são adubadas em excesso e áreas com solos mais pobres não são corrigidas aos níveis desejados. O mesmo ocorre com a aplicação de agrotóxicos para combate a pragas e doenças. A quantidade de aplicação são geralmente calculadas com base no maior grau de infestação, resultando na aplicação excessiva em áreas com baixos níveis de infestação. Este tratamento uniforme gera perdas econômicas para o agricultor e pode causar danos ambientais importantes, como, por exemplo, a contaminação dos recursos hídricos da região [13].

Desta forma, sistemas de produção agrícola irrigado, principalmente em regiões de irrigação de larga escala, grandes áreas cultivadas vêm sendo tratadas de maneira uniforme. Isso traz a tona um dos maiores problemas que os técnicos e agricultores enfrentam no estabelecimento de estratégias de manejo destes sistemas, a variabilidade espacial e temporal de alguns atributos relacionados ao contínuo solo-água-planta-atmosfera.

No caso de investigações relacionadas a variação espacial e temporal de atributos de sistemas de produção irrigados, as medições automáticas requerem registros georreferenciados de elementos ambientais do sistema solo, água, planta e atmosfera. Dentro dessa ótica, a elaboração de bancos de dados bem estruturados e de fácil acesso é tão importante quanto a obtenção desses dados [14]. Como exemplo, a Fig. 2.4 mostra a aplicação de datalogger e um multiplexador conectado a sondas de (TDR) para aquisição das medidas da umidade e condutividade elétrica para estudos da variabilidade espacial do solo encontrada na área cultivada.



Fig. 2.4: Esquema de um Multiplexador.

Estudos realizados atualmente como em [3] mostram a necessidade de conhecer os atributos do

solo em áreas extensas, pois pode haver uma variabilidade significativa no solo, exigindo uma grande quantidade de pontos amostrais, ou seja, uma grande quantidade de sensores, para obter estas informações, sendo que se estes forem caros, torna-se sua aplicação por parte dos produtores inviável. A Fig. 2.5 mostra um exemplo de uma aplicação do estudo da variabilidade espacial feita em uma área de 1Km², se os pontos amostrais fossem feitos de 100 m em 100 m, a quantidade requerida para essa área seria de 100 sensores.



⊗ Ponto de Amostagem

Fig. 2.5: Exemplo de pontos de amostragem em uma área de 1Km².

2.1.4 Automação

O uso de técnica de instrumentação, automação e informática nos sistemas agrícolas irrigados tem auxiliado no manejo das irrigações, indicando a quantidade adequada de água aplicada no solo para prevenir o estresse hídrico das culturas que pode afetar tanto em quantidade, como em qualidade, a produção da cultura. A quantidade de água requerida em cada irrigação e o momento de aplicação dessa água são parâmetros que dependem das condições climáticas do local, tipo de cultura, seu estádio de crescimento, profundidade efetiva do sistema radicular e umidade do solo. Sempre que a água proveniente da chuva não for suficiente para atender a demanda hídrica das plantas e a disponibilidade de água do solo for esgotada a níveis que irão provocar redução significativa de produtividade, haverá necessidade de suprir a necessidade hídrica das culturas com a aplicação de água de irrigação [15]. A Fig. 2.6 mostra um sistema automático de irrigação feito através de uma linha lateral onde a água é aplicada setorialmente através dos dados da umidade do solo vindas das áreas aplicadas.

Nos últimos anos, na agricultura irrigada, tem sido observado um avanço da automação dos sistemas. Atualmente, entende-se por automação qualquer sistema apoiado em processadores que substitua o trabalho humano e que vise soluções rápidas e econômicas, a fim de alcançar os complexos objetivos das indústrias, da agricultura e serviços. A automação implica na implantação de sistemas



Fig. 2.6: Sistema de irrigação automático

interligados e assistidos por redes de comunicação, que possam auxiliar os operadores no exercício de supervisão e análise dos problemas que porventura venham a ocorrer. Em tempos que a escassez de água de boa qualidade é uma realidade mundial, torna-se importante avaliar um sistema de irrigação, seja ele automatizado ou não, para conhecimento de sua eficiência na irrigação, em vista da racionalização no uso deste bem.

Os avanços na informática e no desenvolvimento de sensores de fácil conexão a computadores e "dataloggers" possibilitam a automação total da irrigação. Com a automação, os controladores desenvolvidos são capazes de acionar ou desligar os sistemas de irrigação a partir dos dados enviados continuamente por sensores de umidade do solo. Um sistema automatizado de irrigação bem programado e calibrado garante a umidade necessária às culturas em cada estágio de desenvolvimento, evitando a escassez ou o excesso de água [16].

2.2 Sensores e métodos de medida dos atributos do solo

Com o advento da eletrônica e a disponibilidade de "software" de processamento, vários tipos de transdutores têm sido testados, visando a estimativa dos atributos do solo. O uso desses transdutores tem por objetivo a otimização do consumo de água e aplicação da quantidade correta de fertilizantes e agrotóxicos e conseqüentemente obter o retorno econômico da atividade da agricultura irrigada. Contudo, tem-se buscado cada vez mais por parte dos agricultores o uso de técnicas no intuito de tornar seu sistema de irrigação mais eficiente.

Para o monitoramento da umidade, constante elétrica e temperatura no solo, existem diversos tipos de equipamentos, porém, a maioria se restringe somente a trabalhos de pesquisas, pois tem custo elevado e requerem um mínimo de conhecimento e treinamento para sua utilização no campo.

Para determinar a umidade do solo exitem métodos diretos e indiretos. Dentre os métodos diretos, o gravimétrico é o mais utilizado, consistindo em amostrar o solo e, por meio de pesagens, determinar sua umidade gravimétrica (u), relacionando a massa de água com a massa de sólidos da amostra ou a umidade volumétrica (θ), relacionando o volume de água contido na amostra e o seu volume.

Um dos problemas na determinação da umidade pelo método direto esta na demora de pelo menos 1 dia para obter o resultado. As amostras do solo vão para a estufa a 105°C onde permanecem por

24 horas para garantir que as amostras estejam secas e assim, por meio de pesagens antes e após a colocação na estufa, determina-se a relação de massa de água com a massa de solo seco.

Para determinação instantânea da umidade os métodos indiretos são considerados mais adequados para indicar o início e a duração da irrigação. Segundo [17], os principais métodos indiretos baseiamse em medidas como a moderação de nêutrons, a resistência do solo a a passagem de corrente elétrica, a constante dielétrica do solo e a tensão da água no solo.

2.2.1 Método capacitivo

É uma técnica que estima a quantidade de água no solo por meio da medida da sua constante dielétrica, medida esta feita através da capacitância entre dois eletrodos implantados no solo. Como mostrado na Fig. 2.7 os eletrodos são submetidos a um sinal de excitação de freqüência conhecida e mede-se a impedância do circuito por ele formado [18].



Fig. 2.7: Método Capacitivo

O conteúdo de água no solo pode ser determinado pelas variações da constante dielétrica causadas pela água no solo. No caso de solos arenosos, onde a água livre predomina, a constante dielétrica é diretamente proporcional ao conteúdo de água. O sinal obtido não é linear com o conteúdo de água e é influenciado tanto pelo tipo, como pela temperatura do solo. Portanto, esse método requer calibração cuidadosa na instalação e também durante todo o tempo de uso, pois sua estabilidade a longo prazo é questionável.

2.2.2 Blocos Porosos

O blocos porosos medem de forma indireta, por meio de resistência elétrica ou por dissipação de calor, o teor de umidade do solo. O método da resistência elétrica toma por base a variação da

resistência do solo a passagem de corrente elétrica, a qual é tanto menor quanto maior dependendo da sua umidade, porém, para isso, é necessária uma calibração das leituras de umidade ou tensões. Embora seja um equipamento de boa precisão e custo não muito elevado seu emprego no campo tem sido restrito principalmente devido a variabilidade do solo, dos próprios blocos e da faixa de umidade em que funciona corretamente, na sua maioria são constituído de uma "Ponte de Wheatstone" para medição da resistência elétrica ou eletrodos que medem a diferença de potencial de um eletrodo para o outro dentro da capsula porosa [19].

O método da dissipação da temperatura no solo estima a umidade no solo avaliando a variação do ΔT dentro da capsula porosa causado pela aplicação e um pulso de calor. Para isso basta ler o valor da temperatura da capsula antes e após ter sido aplicado um pulso de corrente em uma resistência ao lado do sensor de temperatura [20].

Os blocos porosos disponíveis no mercado são feitos de diversos materiais porosos que vão desde o tecido de náilon e fibra de vidro até aos blocos de gesso resinado moldados em diferentes formas. A Fig. 2.8 mostra dois sensores de blocos porosos, um que utiliza o método de dissipação de calor e o outro que mede a resistência para calcular a umidade do solo.



Fig. 2.8: Sensor de bloco poroso que utiliza o método da resistência elétrica e da dissipação de calor

2.2.3 Sonda de nêutrons

No caso das sondas de nêutrons o instrumento consiste de uma fonte de nêutrons rápidos, geralmente Ameridio 241/Berilo, e um detector de Hélio-3 para os nêutrons termalizados, que desce por um tubo de parede fina de alumínio ou PVC inseridos no solo e ao ser acionada, a fonte libera nêutrons que se espalham colidindo com os diferentes corpos no solo que provocam redução da sua energia cinética. A redução da energia é máxima quando os nêutrons encontram núcleos de Hidrogênio presentes no solo que reduzem a sua energia inicial a valores característicos dos núcleos de hidrogênio.

Embora o hidrogênio seja um componente da matéria orgânica, a maior parte deste elemento no solo ocorre como componente da água. Portanto, a contabilização dos nêutrons termalizados, ao redor da fonte de nêutrons rápidos, indica de forma razoável o teor de água no solo, as críticas são dirigidas principalmente ao processo de calibração da sondas no campo, além disso, a sonda emprega um processo radioativo que requer cuidados de segurança e treinamento especiais para os operadores

[21]. A Fig. 2.9 mostra uma sonda de nêutrons utilizado para medir a umidade do solo em uma plantação de eucalipto.



Fig. 2.9: Sonda de Nêutrons.

A equação interna de calibração do aparelho, fornecida pelo fabricante, pode ser considerada adequada para muitos casos. Porém, recomenda-se verificar tal calibração, determinando-se umidade gravimétrica e o peso especifico aparente do solo a ser manejado. Em caso de diferença grande entre valor real e estimado, sugere-se a calibração do aparelho em campo ou laboratório.

2.2.4 Reflectometria no domínio do tempo

A técnica de TDR baseia-se no efeito da umidade do solo sobre a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em hastes condutoras envoltas por solo. Este fenômeno se deve a diferença entre as constantes dielétricas da água, do ar e do material sólido no solo. Na matriz do solo as constantes dielétricas variam entre 1 e 81. O ar possui o valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variam entre 3 e 5, e a água possui o valor máximo 81.

A técnica da TDR determina a constante dielétrica (Ka) medindo o tempo de propagação de uma onda eletromagnética através de um cabo coaxial até um sensor (sonda), imerso em um meio. Parte da onda incidente, que pode ser produzida por um testador de cabos, é refletida ao atingir o sensor, devido a diferença de impedância entre este e o cabo coaxial. O remanescente da onda propaga-se pelo sensor até alcançar a sua extremidade, sendo também refletida. O tempo de propagação da onda (t), entre o inicio e o final do sensor, pode ser medido pelo osciloscópio do testador de cabos [22] e obtido pela equação:

$$t = \left(\frac{2LKa^{0,5}}{c}\right) \tag{2.2}$$

em que:

t = tempo em segundos;

L = o comprimento do sensor (m);

Ka = a constante dielétrica relativa do meio;

c = a velocidade da luz no vácuo $(3.10^8 \text{ m s}^{-1})$.

Rearranjando a Eq. 2.2, tem-se:

$$Ka = \left(\frac{ct}{2L}\right)^2 \tag{2.3}$$

Em um testador de cabos comercial, o termo (ct/2) da Eq. 2.3 é reduzido a um comprimento aparente da sonda (La), conforme a Eq. 2.4:

$$Ka = \left(\frac{La}{L}\right)^2 \tag{2.4}$$

em que:

(La) = a distância entre as reflexões no inicio e final da haste do sensor.

Assim, conhecendo-se (Ka), pode-se estimar a umidade volumétrica do solo por meio de calibrações obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório, a Fig. 2.10 mostra a fabricação de uma sonda de TDR.



Fig. 2.10: Fabricação de uma sonda de TDR.

2.2.5 Temperatura no solo

Segundo [23], a temperatura do solo é um dos fatores mais importantes para o desenvolvimento das plantas. O solo, além de armazenar e permitir os processos de transferência de água, solutos e gases, também armazena e transfere calor. A capacidade de um solo de armazenar e transferir calor é determinada pelas suas propriedades térmicas e pelas condições meteorológicas que, por sua vez, influenciam em todos os processos químicos, físicos e biológicos do solo.

A atividade microbiológica poderá ser interrompida, as sementes poderão não germinar e as plantas não se desenvolverem, se o solo não se apresentar dentro de uma faixa de temperatura adequada para a manutenção dos processos fisiológicos envolvidos. As propriedades físicas da água e do ar no solo, bem como seus movimentos e disponibilidade no solo, além de muitas reações químicas que liberam nutrientes para as plantas, são influenciados pela temperatura do solo. Além disso, o calor armazenado próximo da superfície do solo tem grande efeito na evaporação. As propriedades térmicas do solo e as condições meteorológica, portanto, influem no meio ambiente das plantas. Experimentos em condições controladas com plantas de zonas temperadas e subtropicais tem evidenciado que baixas ou altas temperaturas na zona radicular reduzem o crescimento e causam estresse hídrico nas plantas, reduzindo o potencial hídrico de folhas e a taxa de assimilação de carbono [24]. A falta dessas informações para as condições tropicais, pode limitar o desenvolvimento de práticas que visem reduzir os efeitos negativos da flutuação da temperatura na zona radicular sobre o desenvolvimento e a produtividade vegetal.

Através de medidas das variações de temperatura entre dois pontos no solo quando um deles recebe um pulso de calor, é possível determinar a umidade volumétrica do solo relacionando as variações de temperatura medidas com o conteúdo de água no solo. Estudos com diversos tipos de sensores de temperatura e geometrias diferentes vem sendo utilizadas para estimar a umidade volumétrica, como é o caso dos trabalhos que utilizam termistores [25],[26],[27] e os trabalhos que utilizam sensores de temperatura CMOS [28],[29], e usando esse método da medida da variação da temperatura o sensor passa a ter mais um dado das propriedades do solo, a temperatura.

2.2.6 Umidade no Solo

O consumo de água e o seu uso eficiente pelas culturas agrícolas dependem, sobretudo, das condições físicas do solo, das condições atmosféricas, do estado nutricional das plantas, de fatores fisiológicos, da natureza genética e do seu grau de desenvolvimento, [30].

Existem hoje diversos métodos para medidas da umidade volumétrica do solo, entre eles o capacitivo, resistivo, Wenner "array" e o TDR. Porém estes métodos sofrem interferência direta da condutividade elétrica do solo, fazendo com que esses sensores precisem ser calibrados para cada tipo de solo, e mesmo após calibração, se houver um acréscimo na quantidade de sal no solo, o que acontece, por exemplo, no caso de uma fertirrigação, isso implica em um erro na determinação da umidade, e torna necessária uma nova calibração do sensor.

Com a necessidade de determinar a umidade do solo sem interferência da condutividade elétrica, a técnica de medida de dissipação térmica, através da medida de diferenças de temperatura, parece ser muito atrativa. A possibilidade de se fazer os sensores de temperatura com alta precisão, baixo custo e integrados junto com os circuitos de processamento, como o sensor de temperatura desenvolvido em [31], que utiliza um circuito com transistores bipolares que tem a propriedade de produzir voltagem diretamente proporcional ao valor da temperatura, é altamente atraente quando se deseja sensores para medida de umidade do solo de baixo custo e fácil utilização.

Com isso, trabalhos que utilizam um método onde a variação da temperatura (ΔT) encontrada no solo é utilizada para poder determinar o valor da umidade tem apresentado bons resultados, como os vistos em [27] e [32], que utilizaram o valor da variação da temperatura para determinar a quantidade de água disponível no solo.

A Fig. 2.11 mostra um sensor que utiliza a técnica de dissipação de calor para estimar a umidade do solo, o sensor é composto de um aquecedor e dois termistores para medir a variação da temperatura, antes e após ser aplicado um pulso de calor.

2.2.7 Condutividade Elétrica no Solo

A salinização de solos representa um dos graves problemas da agricultura irrigada. O processo de salinização pode ter causas naturais (salinização primária) ou pode ter origem no manejo inadequado



Fig. 2.11: Sensor de dissipação de calor.

do solo e da água pela ação do homem (salinização secundária). A aplicação de fertilizantes junto com a água de irrigação é uma prática rotineira que reduz o custo com mão-de-obra além de obter aplicações mais uniformes. Por ser um agente facilitador das operações de irrigação e adubação, além de apresentar grande eficiência de aplicação, a fertirrigação é utilizada freqüentemente.

Todavia, o seu uso intensivo no processo produtivo, aumenta o potencial de salinização da área cultivada. Portanto, o manejo inadequado dos fatores de produção, aliado ao desconhecimento da fisiologia dos vegetais, pode gerar um acúmulo de sais no solo ou, ainda, nas fontes de abastecimento de água, levando ao comprometimento de recursos naturais. Assim, o monitoramento do teor de água e da condutividade elétrica do solo torna-se imprescindível no uso da fertirrigação.

O método laboratorial do extrato de saturação é considerado o método de referência para determinação da condutividade elétrica do solo, mas é subjetivo, demanda tempo e exige infra-estrutura laboratorial, limitando o número de determinações. Desta forma, faz-se necessário o desenvolvimento de metodologias que realizem determinações com maior rapidez e com boa correlação com o método padrão, permitindo ao produtor uma tomada de decisão imediata. Em condições de campo destacam-se as metodologias de extração de solução a vácuo, além daquelas baseadas na utilização de sensores de indução eletromagnética e que utilizam princípios da TDR capazes de medir a condutividade elétrica no solo [33].

Capítulo 3 Projeto e desenvolvimento dos sensores

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento, no Laboratório de Instrumentação e Sensores do Departamento de Eletrônica e Microeletrônica da Universidade Estadual de Campinas, de um protótipo de um multi-sensor que permite medir os valores da umidade volumétrica, da condutividade elétrica e da temperatura do solo.

Para realizar a medida do valor de condutividade elétrica do solo foi desenvolvido um dispositivo composto por quatro pontas paralelas tipo "Wenner array", também conhecido com "medidor de quatro pontas". Para a medida da umidade do solo foi usado o método indireto que usa a variação da condutividade térmica do solo em função da quantidade de água nele presente, medida esta feita através da variação de temperatura em uma das hastes do centro do dispositivo de quatro pontas, enquanto se aplica um pulso de calor na outra haste.

Será apresentado, a seguir, o projeto e o desenvolvimento do MS e dos seus respectivos circuitos eletrônicos. A Fig. 3.1 mostra um diagrama geral de como foi montado o ensaio experimental para fazer a aquisição das medidas realizadas pelo MS.



Fig. 3.1: Diagrama do ensaio experimental

3.1 Método do "Wenner Array" (Quatro Pontas)

Levantamentos de resistividade elétrica do solo têm sido usados há muitas décadas em estudos hidrogeológicos, de exploração mineral, geotécnicos e em projetos de aterramento elétrico. Mais recentemente têm sido aplicados também em estudos ambientais e agrícolas. A resistividade do terreno está relacionada a vários parâmetros geológicos tais como o conteúdo fluido e mineral, a porosidade e o grau de saturação em água. A medida de resistividade feita usando o chamado método do "Wenner array" (ou quatro pontas) permite determinar a distribuição da resistividade aparente do solo evitando-se ao máximo os erros devido aos problemas inevitáveis causados pela resistência não nula de contato elétrico entre as hastes do medidor e do solo. A partir destas medições de resistência é possível calcular a resistividade verdadeira, a partir de uma curva de calibração do sensor.

Para realizar medições da condutividade elétrica do solo foi desenvolvido um MS utilizando a configuração do "Wenner array" (medidor de 4 pontas), conforme o diagrama apresentado na Fig. 3.2. O medidor injeta uma corrente elétrica no solo através dos dois eletrodos externos (A e D) e a tensão é medida entre os eletrodos internos (B e C), de forma que as resistências de contato entre as haste A e D e o solo não interfiram na medida da resistência a ser determinada, obtida através da medida entre os terminais B e C. Para que isso seja verdade, o voltímetro usado para medir a queda de tensão entre as pontas BC deve possuir impedância de entrada muito alta, de forma que a corrente que circula pelas hastes BC é praticamente nula. Se isto acontecer, o erro cometido na medida da resistência não é afetado pelas resistência de contato das hastes com o solo, tornando o medidor muito mais fácil e prático de ser empregado no solo.



Fig. 3.2: Diagrama do medidor de quatro pontas

A resistividade aparente (ρ a) é calculada a partir dos valores de corrente (I) e da tensão (V), conforme a Eq. 3.1:

$$\rho_a = K \times \left(\frac{V}{I}\right) \tag{3.1}$$

em que:

K = fator geométrico que depende do arranjo dos quatro eletrodos;

V = valor da tensão medida;

I = valor da corrente medida.

A Fig. 3.3 mostra o arranjo comumente usado em estudos de resistividade e seu respectivo fator geométrico.



Fig. 3.3: Arranjo "Wenner Alpha" comumente usado em estudos de resistividade e seus respectivos fatores geométricos.

Para o desenvolvimento do MS foi utilizado o "Wenner array alpha", em que k é dado pela Eq. 3.2.

$$K = 2\pi a \tag{3.2}$$

sendo que a = é o valor da distância entre as hastes.

Como o MS permite medir os valores de $I \in V_{BC}$, a resistividade aparente é calculada pela Eq. 3.1, e para se calcular valor da condutividade elétrica no solo, basta tomar o inverso, o que resulta na Eq. 3.3.

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{2\pi a}\right) \cdot \left(\frac{I}{V_{BC}}\right) \tag{3.3}$$

Com os dados da resistência no solo, para um solo que não tenha sua composição alterada, é também possível estimar a umidade volumétrica, já que a resistência muda em função do valor da umidade no solo. Porém, como já mencionado anteriormente, a condutividade elétrica do solo muda com a aplicação de fertilizantes através da irrigação. Dessa forma, se outra técnica for usada simultaneamente para medir a umidade do solo, é possível, em princípio, determinar a quantidade de sais no solo, comparando-se os valores de umidade medidos com o medidor tipo "Wenner array" (que são afetados pela variação da composição química do solo) e os valores de umidade obtidos com outra técnica.

Embora não tenham sido feitas medidas para validar esta técnica e, portanto, não se possa adiantar se uma medida precisa da quantidade de sais no solo possa ser realizada com este método, certamente é possível obter-se uma curva de calibração que permita estimar a presença em maior ou menor valor de resíduos de fertilizantes no solo.

3.2 Método de dissipação de calor

Para evitar a interferência da concentração de sais no solo na medida do valor da umidade, buscouse um método que utiliza a variação do valor da dissipação térmica do solo (ΔT) para estimar o valor da umidade no solo. Com isso ganha-se uma outra variável muito importante do solo, a temperatura, já que para se obter a o valor da medida de ΔT do solo é necessário medir a temperatura inicial e final do solo causado por um pulso de calor gerado através de um pulso de corrente aplicado em uma resistência.

Aproveitando a geometria do MS que utiliza o método "Wenner array" para realizar a medida do valor de I/V, é possível inserir na haste (B), como mostra a Fig. 3.2, um aquecedor para fornecer calor ao solo, e para realizar a leitura dos valores da temperatura na haste (C), um sensor de temperatura AD590 [31], responsável por realizar as leituras dos valores da temperatura antes e após ter sido aplicado o pulso de calor.

As medidas dos valores das diferenças de temperaturas de ΔT foram feitas inicialmente em uma amostra de solo saturado, onde a MS foi inserida e, em seguida, a amostra junto com a MS foram levadas a uma balança onde eram realizadas medidas do peso do sistema, de forma a calcular o valor da umidade volumétrica no solo e comparar estes valores com os valores obtidos nas medidas de ΔT , enquanto a água no sistema se evaporava.

As medidas de ΔT eram feitas de acordo com o seguinte procedimento: no início do processo era realizada uma medida do valor da temperatura no solo e, após um pulso de calor aplicado durante 20 s no aquecedor, era realizada uma nova leitura da temperatura no solo. O valor de ΔT era então calculado e o valor do peso do sistema era também medido, para calcular o valor da umidade volumétrica real.

3.3 Projeto dos circuitos eletrônicos

Para realizar o medidor de quatro pontas são necessários dois blocos básicos: uma fonte de corrente *I* e um medidor de tensão *V*. Como o sistema necessariamente tem que incorporar um microcontrolador (para processamento, armazenamento e transmissão dos dados), será utilizado um microcontrolador que já possua um conversor A/D, de forma que a implementação do medidor de tensão seja bastante direta e simples. Portanto, basta adequar os valores de tensão a serem lidos de acordo com as especificações do conversor A/D que o dispositivo de leitura de tensão para o medidor de quatro pontas esteja pronto.

Por outro lado, a fonte de excitação de corrente é bem mais trabalhosa de ser implementada. Devido a problemas já conhecidos com a utilização de correntes contínuas em medidores do tipo quatro pontas em sistemas de aterramento, é necessária a utilização de fontes de corrente alternadas nestes medidores. Os trabalhos mais recentes de medida de condutividade elétrica no solo indicam que o emprego de uma fonte de corrente senoidal de baixa freqüência é o ideal para esta aplicação, embora a complexidade do medidor cresça bastante com esta exigência. As técnicas empregadas recentemente para a geração desta fonte de corrente senoidal [26],[34] são por demais complexas para serem utilizadas em circuitos discretos, sendo portanto necessário que uma nova estratégia fosse utilizada para o circuito a ser desenvolvido neste trabalho, que tem por objetivo poder ser implementado tanto na forma discreta como integrada. A técnica escolhida foi a de realizar um oscilador de relaxação triangular com saída em corrente e utilizar uma técnica de conversão de triangular para senoidal, para obter-se a fonte de corrente senoidal para excitar o "Wenner array".

No esquema apresentado na Fig. 3.4 temos o diagrama de blocos simplificado do gerador de corrente triangular. O capacitor C1 é carregado e descarregado por fontes de corrente de valor constante I_0 , que por sua vez são chaveadas por um comparador com histerese, que determina tanto a amplitude da onda triangular resultante como a sua freqüência de oscilação.



Fig. 3.4: Princípio de operação do circuito gerador de onda triangular.

Na Fig. 3.5 é apresentado o circuito simplificado do bloco que executa esta função. O resistor R1 na entrada do amplificador operacional OP1 tem sobre ele uma tensão que é igual a +Vref ou -Vref, dependendo da posição da chave S1. O valor de -Vref é gerado através de um amplificador inversor (composto pelo amplificador operacional OP2 e os resistores de precisão (1%) R2 e R3).

Com isso, o valor do módulo da corrente sobre R1 é dada por Vref/R1, sendo que, entretanto, pode tanto entrar no capacitor (+Vref ligado a R1) como sair do capacitor (-Vref ligado a R1). Essas correntes constantes são usadas para carregar ou descarregar o capacitor C1 linearmente, dando origem a uma onda triangular. O comparador com histerese formado por OP3 determina quando a chave S1 é mudada de posição, o que ocorre quando as tensões em sua entrada atingem os valores Vc+ e Vc-.

A freqüência e a amplitude da onda triangular, para um dado valor de capacitor C1, são controladas através das tensões Vc+, Vc- e da corrente Vref/R1. Na Fig. 3.6 apresenta-se o comparador com histerese, formado por OP3, R7, D41 e D42 que, juntamente com o transistor Q1, controlam a chave de corrente composta pelos diodos D1 - D4.

O sinal triangular gerado por este circuito tem amplitude de 1 Vp, e os valores de R1, C1 são ajustados para que a sua freqüência seja de aproximadamente 110 Hz, como sugerido na literatura para evitar interferência com os sinais normalmente presentes de 60 Hz da rede de alimentação [35],[36].



Fig. 3.5: Diagrama básico do circuito gerador de onda triangular.



Fig. 3.6: Circuito da chave de corrente e comparador com histerese do gerador de onda triangular.

O sinal triangular é injetado no conversor triangular-senoidal apresentado na Fig.3.7, que é composto por um par diferencial degenerado (formado por Q2, Q3 e R4) alimentado por fontes de corrente constante (Q4 e Q5), que têm seus valores definidos através do resistor R3 e do transistor Q6, que forma um espelho de corrente com Q4 e Q5.

Conforme apresentado em [37], para obter-se a menor distorção harmônica na senoidal obtida na saída deste conversor, as correntes em Q4 e Q5 (que são iguais), devem ser tais que a queda de tensão sobre R4 deve ser dada por:



Fig. 3.7: Circuito do conversor triangular-senoidal.

$$V_{R2} = IC_{Q4} \times R2 = IC_{Q5} \times R2 = 2,5 \times \frac{kT}{q}$$
(3.4)

e o valor da amplitude do sinal de entrada no conversor deve ser:

$$V_M = 175 \, m V_p \tag{3.5}$$

A corrente de coletor do transistor Q3 é a corrente senoidal que será injetada no medidor de quatro pontas. O seu valor é definido pelas correntes do coletor de Q4 e Q5, sendo que o valor de pico da corrente a ser injetada no "Wenner array" será igual à corrente de coletor de Q6, que é ajustada em aproximadamente 100 μ A.

Uma das propriedades mais importantes deste circuito desenvolvido para o excitador/medidor do "Wenner array" é o fato de que ele não precisa ser calibrado. Isso foi possível devido às características de simetria do conversor triangular-senoidal, que apresenta exatamente a mesma forma de onda de corrente nos dois ramos do circuito (as correntes de coletor de Q2 e Q3), com uma defasagem de 180 graus. Esta diferença de fase é inerente aos circuitos com par diferencial, e neste caso permite que o valor da resistência aparente medida nas hastes centrais do "Wenner array" seja obtida automaticamente, apenas medindo os valores da tensão entre estas hastes e o valor da tensão sobre o resistor R_{cal} , ligado no coletor de Q2.

De fato, se a tensão de pico medida entre as hastes centrais do quatro pontas é V_{med} , a resistência aparente R_{solo} será dada por:

$$R_{solo} = \frac{V_{med}}{IC_{Q3}} \tag{3.6}$$

Entretanto, sabe-se que a tensão sobre o resistor R_{cal} é dada por:

$$V_{R_{cal}} = R_{cal} \cdot IC_{Q3} \tag{3.7}$$

Como o valor de pico da corrente de coletor IC_{Q3} é o mesmo da corrente IC_{Q4} , medindo-se a tensão sobre o resistor R_{cal} pode-se escrever:

$$IC_{Q3} = \frac{V_{R_{cal}}}{R_{cal}} \tag{3.8}$$

que substituindo na Eq. 3.6 permite escrever:

$$R_{solo} = \frac{V_{med}}{V_{R_{cal}}} \cdot R_{cal} \tag{3.9}$$

Logo, usando um resistor de precisão para R_{cal} , basta medir os valores das tensões sobre o próprio R_{cal} e entre as hastes centrais do quatro pontas Vmed para se obter o valor da resistência do solo, sem necessidade de qualquer tipo de calibração. Esta é uma grande vantagem para o processo de fabricação deste sensor.

As medidas do valores de tensão sobre o resistor R_{cal} e entre os pontos das hastes centrais do quatro pontas são realizadas através de dois amplificadores diferenciais de instrumentação, conforme apresentado na Fig. 3.8. Para evitar erros devido o descasamento de resistores e aumentar a rejeição de modo comum, foi utilizado um amplificador de instrumentação já encapsulado com os três amplificadores operacionais e todos os resistores de ganho no CI. O amplificador escolhido foi o INA121 da Burr Brown [38].

Na Fig. 3.9 é apresentado o circuito completo do excitador/medidor usado no sensor de quatro pontas, e na Fig. 3.10 são apresentadas duas fotos do sensor: uma no solo e outra dentro de um tubo de PVC preenchido com solo, usado no sistema de calibração automática.



Fig. 3.8: Circuito dos dois amplificadores diferenciais usados para medir V_{cal} e V_{med} .



Fig. 3.9: Circuito da parte analógica do sensor de quatro pontas



Fig. 3.10: Figura do sensor de quatro pontas

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Calibração do Sensor

Após alguns testes iniciais de funcionamento, onde o sensor foi introduzido em solos com umidades volumétricas diferentes apenas com o intuito de verificar o seu funcionamento, passou-se para a etapa de calibração do sensor.

Para realizar o procedimento de calibração foi utilizado um condutivímetro de bancada Digimed modelo DM-31. Soluções de cloreto de potássio com diversas concentrações (faixa de condutividade elétrica de 0,1 mS a 1,4 mS) foram usadas no procedimento de calibração, onde os dados da condutividade elétrica medidos com o DM-31 foram comparados com os dados de I/V medidos pelo MS desenvolvido [39]. Os resultados são apresentados na Fig. 4.1, onde a curva de calibração pode ser obtida. O resultado, ajustado através de uma regressão linear, é uma reta dada por:

$$E_{cw} = 0,08572(I/V) - 0,08307 \tag{4.1}$$

O alto valor do coeficiente de correlação (R = 0,99458) obtido no cálculo desta reta indica que a MS desenvolvida pode ser usada como uma excelente opção de baixo custo para leitura da condutividade elétrica do solo.

Na Fig. 4.2 são apresentados os erros calculados comparando-se os valores obtidos através da equação da reta ce = 0,08572(I/V) - 0,08307 e os valore medidos de ce com o condutivímetro. Como se vê, o sensor desenvolvido apresenta erros de até 16% quando comparado com o condutivímetro, porém este resultado é muito bom quando comparado com os erros obtidos em outros sensores do tipo quatro pontas ("Wenner array") apresentados na literatura [26], que apresentam erros de até 20%.

Para calcular a umidade volumétrica do solo, foi utilizado o método gravimétrico. Este é um método direto, considerado como padrão para calibração de sensores de umidade do solo, onde o solo seco é pesado, e depois levado para saturar, então o conjunto solo+água é pesado em uma balança de precisão, durante todo o processo de evaporação da água, sendo, portanto, possível determinar com alta exatidão, a cada pesagem, o volume de água que está no solo. Como este trabalho é bastante tedioso e sujeito a erros (pois são feitas várias leituras, enquanto a água do solo evapora) foi desenvolvido um sistema automático de aquisição de dados, onde o peso do solo e os parâmetros elétricos do sensor são lidos e armazenados em um PC, de forma que a calibração pudesse ser realizada de forma auto-



Fig. 4.1: Calibração do "Wenner Array": medida de I/V para diferentes valores de concentrações em soluções de KCl.



Fig. 4.2: Valor do erro em percentual da medida da condutividade elétrica usando o MS, assumindo uma curva de calibração dada por uma reta.

mática. Esse dispositivo é constituído por uma célula de carga de baixo custo e uma placa eletrônica de precisão para a aquisição de dados que se comunica com um computador através da porta serial (RS 232). A placa de aquisição usa o micro-controlador ATmega8235 da Atmel para a comunicação com o PC, para a conversão A/D (já que ele possui um conversor AD de 10 bits, multiplexado em 8 canais), e também para disponibilizar 2 bytes de entrada e saídas de sinais digitais. A Fig. 4.3 mostra o diagrama básico do circuito utilizado.



Fig. 4.3: Esquema da aquisição da umidade do solo usando uma célula de carga.

Para condicionar o sinal da célula de carga, que é da ordem de grandeza de 10^{-3} V que precisa ser lido pelo conversor A/D que tem fundo de escala de 5V, foi desenvolvido um amplificador com características muito interessantes, com o emprego de uma referência analógica variável para tarar a célula de carga. Desta forma, é possível escolher a faixa de interesse da variação do peso, e aumentar até uma ordem de grandeza a resolução da conversão A/D, com um circuito de muito baixo custo.

No ensaio realizado foram colocados 1.000 gramas de solo para saturar e após a saturação (24 horas) o conjunto solo+água estava com o massa total de 1.330 g. Portanto, a faixa de interesse para a realização da medida no conversor A/D é entre 1.000 g e 1.330 g. Dessa forma, ajusta-se a saída do amplificador para medir somente essa variação do peso da água, de modo que a tensão de saída no amplificador seja nula quando a massa que está sendo medida seja de 1.000 g. e que seja igual ao fundo de escala quando a massa a ser medida seja de 1330 g, aumentando a resolução do sistema [40].

Por exemplo, para este caso apresentado (1.000g solo seco e 1.330 g solo saturado), se um conversor A/D de 10 Bits com faixa de entrada entre 0 e 5 V for usado com fundo de escala fixo em 5.000 g, o tamanho do passo de conversão é de 5.000 g/1023 e a resolução do sistema de medida será de 5.000/1023 = 4,888 g. No amplificador desenvolvido, que permite o ajuste do zero analógico e do fundo de escala, se o zero for deslocada para 1.000 g e o ganho for ajustado para que 1.330 g resulte em 5V na saída do amplificador, a resolução passa a ser de 330 g/1023, ou seja, 0,322 g, o que é uma ordem de grandeza melhor do que nos amplificadores convencionais de células de carga.

Na Fig. 4.4 é apresentada a calibração da célula de carga, sendo que o valor do coeficiente de correlação foi de R = 0,99879, indicando que a mesma pode ser usada para medida da umidade do solo para calibração do MS sem que as não linearidades do amplificador desenvolvido alterem os resultados das medidas [41].

Conhecendo o peso da massa de água e a massa do solo seco, calcula-se a umidade com base em peso ou umidade gravimétrica, em que:

$$U = \frac{m_a}{m_s} \tag{4.2}$$

em que:



Fig. 4.4: Calibração da balança.

U = umidade gravimétrica (kg/kg); ma = massa de água (Kg)

ms = massa de solo seco (Kg).

Conhecendo-se a umidade, pode-se, portanto, calcular a umidade volumétrica do solo (parâmetro usualmente utilizado na área de agricultura), que é dada pela equação:

$$\theta_v = U * D_s \tag{4.3}$$

onde:

 $\begin{aligned} \theta_v &= \text{umidade volumétrica } [\text{m}^3 \, . \, \text{m}^{-3}]; \\ U &= \text{umidade gravimétrica } [\text{kg} \, . \, \text{kg}^{-1}] \\ D_s &= \text{densidade do solo } [\text{Kg} \, . \, \text{dm}^{-3}]. \end{aligned}$

4.2 Desenvolvimento dos programas

Depois de ter sido feita a calibração da MS no modo de condutivímetro, usando diferentes tipos de concentração de sais, havia a necessidade de se realizar um ensaio para a medida da condutividade elétrica no solo usando o MS. A aquisição dos dados das medidas dos valores das amplitudes da corrente e da tensão do MS foi feita inicialmente utilizando um osciloscópio Tektronix 2012B, onde eram medidas no canal 1 o valor da amplitude da corrente e no canal 2 o valor da amplitude da tensão. Esse modelo de osciloscópio dispõe de uma entrada USB em que é possível armazenar os sinais da tela do osciloscópio através de um pen-drive, o que a princípio estava sendo realizado para aquisição das medidas do valores da amplitude da corrente e da tensão medidas na MS, como pode ser observado na Figura 4.5.



Fig. 4.5: Sinal da amplitude da corrente e da tensão medidas pelo osciloscópio

Devido a necessidade de se ter os valores das amplitudes dos sinais adquiridos em intervalos de algumas dezenas de minutos, para serem comparados com a umidade do solo a medida que este fosse perdendo umidade, surgiu a necessidade de se desenvolver um programa que realizasse essas aquisições de forma automática.

Desta forma, foi desenvolvido um programa em LabView que controla o sistema automático de medidas e calibração. As medidas dos valores das amplitudes dos sinais eram feitas, como anteriormente, através do osciloscópio, controlado por meio da porta USB do computador. As medidas foram realizadas até que o solo inicialmente saturado perdesse quase toda sua umidade, garantindo assim uma ampla amplitude de calibração do sensor. Após a realização da leitura dos valores das amplitude da corrente e da tensão, o valor da resistência é calculado pelo programa em LabView e mostrado em um gráfico x,y na tela do PC, em função do tempo. Os valores das amplitudes são tratados passando por um filtro passa baixas (para eliminação de ruído) e depois são mostrados na tela principal do programa.

O programa também é responsável em calcular e apresentar os dados da umidade do solo, calculados através das medidas da célula de carga, que são realizadas pela parte analógica da placa de aquisição de dados, convertidas para digital pelo conversor A/D do microcontrolador e transmitidas via porta RS 232 para o PC.

Para aquisição dos dados do sensor de dissipação térmica, o programa realiza a medida do valor da temperatura no solo (lida em um sensor de temperatura AD590 inserido em umas das hastes do MS). A medida da temperatura foi mostrada num gráfico x,y na tela do PC. Essa temperatura foi utilizada para o calculo do valor de ΔT , que é a diferença entre a leitura inicial do sensor de temperatura (inserido em uma das hastes centrais da MS) e a leitura final do sensor de temperatura após o disparo de um pulso de corrente fornecido a um resistor inserida na outra haste central da MS. Após o calculo da temperatura final menos a inicial (ΔT) lidas com sensor de temperatura, eles são apresentados na tela do programa em Labview.

Na Fig. 4.6 são apresentados os gráficos da amplitude da corrente, da tensão, resistência, umidade, temperatura e ΔT feitos pelo programa. Os valores de cada ponto nestes gráficos são também salvos em um arquivo para que uma análise posterior dos resultados obtidos durante o ensaio possa ser feita.



Fig. 4.6: Interface do programa em LabView

4.3 Análise dos resultados medidos utilizando o "Wenner Array"

Após terem sido realizados os ensaios, os valores medidos de V/I (resistividade aparente do solo) e de I/V (condutividade aparente do solo) foram traçados, em função da umidade volumétrica do solo. Os resultados são apresentados na Fig. 4.7 e na Fig. 4.8. O coeficiente de correlação obtido

usando uma regressão polinomial de segunda ordem para os valores medidos de I/V (R = 0,9835) indica que uma calibração através de uma simples expressão de segundo grau é suficiente para estimar a condutividade elétrica no solo com erros menores do que 1%, na faixa de 5% a 37% de umidade volumétrica.



Fig. 4.7: Valores medidos da resistência em função da umidade volumétrica



Fig. 4.8: Valores medidos de I/V em função da umidade volumétrica

Uma desvantagem de se tentar utilizar o valor de I/V para calcular umidade do solo é que o valor de I/V muda em função da quantidade de sais encontrados no solo, o que acontece sempre quando se faz uma fertirrigação, necessitando desta forma que seja realizada uma nova calibração do sensor a cada fertirrigação realizada.

Observando a Fig. 4.8, nota-se que para valores de umidade volumétrica abaixo de 16% ocorre uma saturação do valor de I/V, havendo pouca variação desse valor em função da umidade. Entretanto, como os valores de umidade abaixo de 16% apresentam, em geral, pouco interesse para aplicações na área agrícola (pois quando a umidade chega a esse patamar a planta já estaria sofrendo estresse hídrico, pois para esse valor de umidade é muito difícil para a planta retirar aguá do solo), é de grande valia determinar uma nova curva de calibração para o sensor, na faixa de 16% a 37% de umidade volumétrica.

Na Fig. 4.9 a umidade volumétrica entre 16% e 37% é traçada, para valores de condutividade elétrica (Ce_{solo}) . O resultado é que nesta faixa, a aproximação de $f(\theta) = (Ce_{solo})$ é uma reta. O alto valor do coeficiente de correlação de R = 0,99967 mostra que com os valores da medida de (Ce_{solo}) , é possível estimar a quantidade de água no solo, mas como já foi dito, sempre que ocorrer uma aplicação de agua ou fertirrigação causaria uma mudança no valor da medida da (Ce_{solo}) , requerendo uma nova calibração do sensor para realizar novas medidas.

Contudo, foi utilizado um outro método, onde a variação da condutividade elétrica no solo não interfere de maneira direta para se estimar o valor da quantidade de agua no solo. Para isso, será apresentado na próxima sessão, um método que utiliza a dissipação de calor no solo, para estimar a umidade volumétrica no solo.



Fig. 4.9: Valor da umidade volumétrica em função da ce no solo

4.4 Análise dos resultados medidos utilizando o método da dissipação de calor

Aproveitando a configuração do primeiro protótipo do MS, que possui espaçamento entre as hastes de 1,5 mm, foi realizado um primeiro ensaio para a medida da variação de temperatura em função da aplicação do pulso de calor. O MS foi inserido em uma amostra de solo saturado e os valores da medida da variação de temperatura (ΔT) na haste detectora foram comparadas com os valores da umidade volumétrica do solo.

Os valores de ΔT foram calculados lendo o valor da temperatura inicial no solo (T1) em um sensor de temperatura AD50 inserido na haste (C), como mostra a Fig. 3.2. Logo após foi aplicado um pulso de calor durante 20s em um aquecedor inserido na haste (B), sendo então novamente medida a temperatura final (T2) no sensor na haste (C). Desta forma calculou-se o valor de ΔT , fazendo-se T2 - T1.

A Fig. 4.10 apresenta um gráfico da variação dos valores de (I/V) e de ΔT em função da umidade do solo. Observa-se que não houve variação de ΔT em função da umidade. Este resultado foi inesperado, pois teoricamente deveria haver uma variação de ΔT se a umidade do solo varia. No ensaio realizado, a umidade volumétrica variou intensamente (verificado através do MS e do método gravimétrico), sem que fosse possível medir variações de temperatura, o que não foi possível de explicar inicialmente.



Fig. 4.10: Variação de I/V e de ΔT em função da umidade volumétrica

Fez-se, então, um segundo ensaio, utilizando a mesma configuração do "Wenner array" anterior, porém, para este novo ensaio o espaçamento entre as hastes foi de 6 mm. As medidas dos valores de ΔT foram obtidas usando a mesma metodologia descrita anteriormente. Neste ensaio o sensor comportou-se como esperado. O valor de pico da variação da ΔT foi de 0,34°C para umidade volumétrica do solo em 33%, como mostrado na Fig. 4.11. Após a secagem da mesma amostra de solo até 18% de umidade volumétrica, fez-se uma nova leitura do pico de ΔT , como mostra a Fig. 4.12, obtendo-se o valor de 0,44°C. Fez-se uma última leitura do pico de ΔT , com a amostra apresentando 5% de umidade volumétrica, em que o valor medido foi de $\Delta T = 0,64$ °C conforme é apresentado na Fig. 4.13.

Desta forma, notou-se que a medida que a amostra de solo foi perdendo umidade, houve um acréscimo nos valores medidos para o pico de ΔT . Com esta nova configuração de espaçamento das hastes do MS, foi possível observar o comportamento na variação de ΔT em função da umidade



Fig. 4.11: Avaliação do pico da ΔT para 33% de umidade volumétrica no solo .



Fig. 4.12: Avaliação do pico da ΔT para 18% de umidade volumétrica no solo .

volumétrica do solo, como esperado, o que não foi possível notar com espaçamento de 1,5 mm usado no ensaio anterior.

A explicação que damos para o fenômeno observado é que com o volume de solo entre as hastes em espaçamento reduzido não ocorre dissipação do calor no solo suficiente para que a temperatura na haste de medida seja diferente da haste onde é aplicado o pulso de calor.

Porém, ao se aumentar o espaçamento entre as hastes, o volume do solo entre elas é maior, e desta forma, a medida de ΔT é bastante influenciada pelo meio em que as hastes estão inseridas (o solo), além do conteúdo da água presente no solo. Buscando obter maiores informações do comportamento da dissipação da temperatura nas amostras de solo, fez-se três repetições da leitura do pico de ΔT ,



Fig. 4.13: Avaliação do pico da ΔT para 5% de umidade volumétrica no solo .

com o objetivo de avaliar o comportamento do pico da ΔT para uma mesma umidade do solo, ou seja, se as leituras medidas do pico de ΔT teriam uma repetibilidade para uma mesma umidade.

Para as mesmas umidades de 33%, 18% e 5%, fizeram-se três repetições nas leituras do pico de ΔT (Figuras: 4.14, 4.15, 4.16), sendo que o aquecimento na haste C só era realizado quando a temperatura final voltasse a temperatura inicial, garantindo assim, as mesmas condições para aquisição da nova medida.



Fig. 4.14: Avaliação do pico da ΔT para solo saturado.

Fica evidente que para as três umidades estudadas, o valor do pico de ΔT na primeira leitura é menor, e com a repetição das leituras, este valor vai aumentando. Isso só pode ocorrer se a umidade



Fig. 4.15: Avaliação do pico da ΔT para solo úmido.



Fig. 4.16: Avaliação do pico da ΔT para solo seco.

do solo no local onde se está fazendo a medida diminuir de uma leitura para outra. Isto provavelmente ocorre devido ao fato de que o aquecimento da haste B do MS provoca a secagem do solo na região onde ele esta inserido. Assim, quanto maior for a repetição do número de leituras sem que seja dado tempo para a água retornar para a região de onde ela foi expulsa, mais seco vai ficando o solo na região próxima à haste B e maior será o valor de ΔT medido.

Logo, para realizar a calibração do MS para medir a umidade do solo, é extremamente importante que a leitura do pico de ΔT não sofra influencia da secagem do solo devido ao seu aquecimento, causado pela a haste do MS. Portanto, na calibração do sensor, foram usados os dados obtidos apenas com as primeiras leituras realizadas em cada valor de umidade. Os valores do pico de ΔT obtidos



pela primeira leitura em cada umidade estão apresentados na Fig. 4.17.

Fig. 4.17: Avaliação do pico da ΔT para diferentes tipos de umidade.

Com os valores do pico de ΔT fez-se a calibração do MS em função da umidade do solo. Os resultados medidos para a umidade volumétrica no solo com a técnica de medida da variação da temperatura (ΔT) também apresentaram comportamento linear na faixa medida, como se vê na Fig. 4.18, tendo sido obtido um valor de R = 0,98028 para a reta $\Delta T \times \theta$.



Fig. 4.18: Valor medido de ΔT em função da umidade volumétrica do solo.

Para um intervalo medido da umidade volumétrica entre 0,33 m³. m⁻³ a 0,05 m³. m⁻³, ou seja uma faixa de 0,28 m³. m⁻³, observa-se que a variação medida em ΔT foi de 0,3 °C, como pode ser observado na Fig. 4.17. Como a saída do sensor é de 255,3 mV/°C, a resolução obtida na medida para a umidade do solo foi de 1,91% m³. m⁻³, devido ao emprego de um conversor A/D de 10 bits.

Porém, é possível obter resoluções de 0,47% m³. m⁻³ simplesmente usando um conversor A/D de 12 bits, já que o nível de ruído presente no sinal permite realizar a medida com esta resolução.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Conclusões

Foi desenvolvido um protótipo de um multi-sensor (MS) para realizar medidas simultâneas da condutividade elétrica (ce), umidade volumétrica e temperatura do solo. Para a calibração do MS como medidor de condutividade elétrica foram medidas várias soluções de KCL (com concentrações diversas) usando um condutivímetro de bancada e os valores obtidos foram comparados com as medidas de I/V utilizando o MS nas mesmas soluções. Os resultados obtidos apresentaram boa linearidade (R = 0,99485). O maior erro entre os valores medidos de I/V (calculado usando a reta média dos pontos da calibração) e os medidos no condutivímetro foi de 16%, que é inferior ao erro apresentado por outros autores que usam o método do "Wenner array", onde se observa erros de até 20%.

Todo o planejamento, projeto e desenvolvimento do MS foi realizado baseando-se em um levantamento bibliográfico realizado em pesquisas, manuais, e especificações técnicas de fabricantes de sensores similares encontrados no mercado nacional e internacional, em artigos e literatura especializada para um embasamento teórico sustentado por informações conceituais e práticas. A revisão de literatura realizada possibilitou uma visão atual das técnicas e métodos do estado da arte em sensores utilizados para medidas das propriedades do solo.

Foi também desenvolvido um sistema de calibração automática do sensor, que permite medir o valor da umidade no solo com base no método gravimétrico. O sistema pode ser usado na calibração de qualquer tipo de sensor, pois possui vários canais de medida analógicos, aquisição de dados através de osciloscópios (para medidas em alta freqüência) e a capacidade do LabView para controle do sistema e processamento dos dados.

As medidas realizadas de umidade volumétrica em função do ce indicam que a MS poderia ser utilizada para se estimar o valor da umidade no solo, porém, para qualquer alteração na composição do solo, seria necessária uma nova calibração do MS, o que, embora seja razoavelmente simples de ser realizado com o sistema automático desenvolvido, é inviável sob o ponto de vista de aplicação no campo.

Para obter-se medidas do valor da umidade do solo independente da sua concentração de sais, foi desenvolvido um sensor que utiliza o método de dissipação de calor, medindo a variação da temperatura ΔT numa haste do sensor após a aplicação de um pulso de calor em outra das suas hastes. Os resultados medidos em sensores com espaçamento entre hastes muito pequeno (1,5 mm) mostraram

que não foi possível medir a variação no valor de ΔT com a resolução da medida de temperatura no nosso sistema. Para medidas realizadas em sensores com espaçamento entre as hastes de 6 mm foi possível detectar as variações de temperatura com grande facilidade. Foi concluído que para distâncias muito pequenas das hastes existe pouca influencia do meio, e as diferenças de temperatura medidas variam muito pouco com a umidade do solo, sendo necessário um medidor de muito alta resolução para obter-se algum resultado mensurável.

Outro fenômeno observado é que para medidas realizadas uma após a outra, com pequenos intervalos entre as medidas (10 a 15 minutos), mesmo aguardado que o valor da temperatura na haste sensora atingisse o seu valor inicial, o resultado calculado para a umidade do solo não é correto. Isso ocorre provavelmente devido à evaporação da água na pequeníssima amostra de solo que foi submetida ao aquecimento. Este fenômeno de evaporação localizada que ocorre quando se realiza uma série de medidas em seqüência é comprovado pela observação do acréscimo no valor de ΔT , ou seja, uma indicação de que a umidade do solo diminui no local.

A resolução obtida na medida para a umidade do solo foi de 1,91% m³. m⁻³, valor este limitado pelo emprego de um conversor A/D de 10 bits. Porém é possível obter resoluções de 0,47% m³. m⁻³, simplesmente usando um conversor A/D de 12 bits, já que o nível de ruído presente no sinal permite realizar a medida com esta resolução.

Os resultados experimentais de laboratório mostram que o MS desenvolvido fornece dados úteis para estimar com precisão necessária para usos agrícolas a umidade, a condutividade elétrica e a temperatura do solo. Trabalhos futuros sugerem a confecção do circuito de condicionamento de sinais em um único circuito integrado e a utilização de comunicação Wireless (Rádio Freqüência, GPRS, Zigbee), para a comunicação entre os sensores sem a necessidade de cabos, visando a utilização no campo. Outra possibilidade, que pretendemos explorar em um doutorado, onde pretende-se desenvolver um MS integrado a um microaspersor, de forma a termos uma irrigação otimizada e individualizada, sem necessidade de redes de sensores, transmissão de dados por GPRS, rádios, etc., o que permitiria um sistema de altíssima eficiência e muito baixo custo.

Referências Bibliográficas

- [1] D. R. BIZARI. Diferentes sistemas de cultivo na economia de água e produtividade do feijão de inverno irrigado. *Tese de Mestrado*, Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp, 2004.
- [2] MATSURA E. E. M. MIRANDA J. H. VAN GENUCHTEN R. ROQUE M. W. BIZARI D. R. ROQUE W. SOUZA, A. L. S. Aplicação da tdr no monitoramento da dinâmica vertical da água e de solutos em coluna de solo não saturado.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Bonito-MS., 2007.
- [3] Márcio William Roque. Variabilidade espacial de atributos físicos-hídricos sobre o cultivo do feijão irrigado submetidos a diferentes tipos de preparo no solo. *Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola (Unicamp), Campinas, S.P.*
- [4] SILVA A. de S. BUSCHINELLI C. C. de A. HERMES L. C. CARVALHO J. R. P. SHANAHAN J. SCHEPERS J. S. JUNIOR, A. L. Agricultura de precisão e meio ambiente. Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto., pages p. 19–36, 2004.
- [5] ELIAS I. A. AMARAL J.R. BALASTREIRE, L.A. Agricultura de precisão: Mapeamento da produtividade da cultura do milho. *Engenharia Rural, ESALQ/USP*, v.8:p.97–111, 1998.
- [6] GIÚDICE M. P. Del QUEIROZ D. M. MANTOVANI E. C. FERREIRA L. R. VALLE F. X. R GOMIDE R.L. BORÉM, A. Agricultura de precisão. v.500:467p, 2000.
- [7] R. L.; QUEIROZ D. M.; TORRE NETO A.; PEDROSO JÚNIOR M.; SANTOS. MANTO-VANI, E. C.; GOMIDE. Utilização de instrumentos e técnicas de agricultura de precisão para o aumento de eficiência dos processos de produção agrícola. O Estado-da-Arte da Agricultura de Precisão no Brasil, II Simpósio Sobre Agricultura de Precisão, Piracicaba, SP, Depto. de Engenharia Rural/ESALQ/USP., page p. 212, 2000.
- [8] E.C.; QUEIROZ D.M. GOMIDE, R.L.; MANTOVANI. Estratégias da pesquisa e da indústria para utilização de agricultura de precisão na região centro-oeste do brasil. XXIII Congresso Nacional de Milho e Sorgo, Uberlândia, MG, 21 a 25 de maio,, page pp. 16, 2000.
- [9] Christofidis, D. A água e a crise alimentar. Página na internet, julho 2007. "http://http://http://www.iica.org.br//".
- [10] P.L. LIBARDI. Propriedades físico-hídricas do solo no estudo do manejo e da conservação do solo e da água. in: Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido. fortaleza: Ufc, 2000. p.214-23.

- [11] E.; ARRUDA F.B.; FOLEGATTI M.V PIRES, R.C.M.; SAKAI. Necessidades hídricas das culturas e manejo de irrigação in: Miranda, j.h.; pires, r.c.m. irrigação. piracicaba: Sociedade brasileira de engenharia agrícola, 2001. v.1, p.121-04.
- [12] PAULO L. LIBARDI MARCOS V. FOLEGATTI. JARBAS H. MIRANDA, SERGIO N. DU-ARTE. Simulação do deslocamento de potássio em colunas verticais no solo não-saturado. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v. 25:p.677–685, 2005.
- [13] S.R. VIEIRA. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental em um latossolo roxo de campinas (sp). *Bragantia*, v. 57:p. 181–190, 1997.
- [14] Z.M. et al. SOUZA. Variabilidade espacial da textura de um latossolo vermelho eutroférrico sob cultivo de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, vol. 24:p. 309–319, 2004b.
- [15] V.A. KLEIN. Sistema automático de irrigação. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHA-RIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. 1 CD-ROM.
- [16] J.C.; RABELO G.F.; BRAGA JUNIOR R.A. QUEIROZ, T.M. de; GIACOMIN. Circuito eletrônico para controle automático, em malha fechada, de sistemas de irrigação através de tensiômetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. Anais... Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. 1 CD-ROM., 2002.
- [17] TEIXEIRA A. S. COELHO, S.L. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.24:p.536–545, set./dez. 2004.
- [18] R.J.; Evett S.R. Baumhardt, R.L.; Lascano. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. *Soil Science Society of America Journal*, v. 64:p. 1940–1946, 2000.
- [19] CAMPBELL, G. S. (Watermark 200, Soil Moisture Sensor). Campbell Scientific, Inc., 2006.
- [20] C. F. Reece. Evaluation of a line heat dissipation sensor for measuring soil matric potential. Soil Science Society of America Journal, v.60:p.1022–1028, 1999.
- [21] J.C. Beltrame, L.; Taylor. Uso da sonda de nêutrons para determinação da umidade do solo no campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, v.4:p.57–61, 1980.
- [22] K. NOBORIO. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.31:p.213–237, 2001.
- [23] Celso Luiz Prevedello. Física do solo com problemas resolvidos. 1996.
- [24] DAVIES F. S. CRANE J. H. SCHAFFER B. GEORGE, H. L. Root temperature effects on arkin carambola (averrhoa carambola 1.). *Scientia horticulturae*, vol. 96:pp. 67–79, 2002.
- [25] BENSON E. J. HAM, J. M. On the construction and calibration of dual-proble heat capacity sensor. Soil Science Society of America, vol. 68:p. 1185–1190, 2004.

- [26] MORAIS R. Tuli A. HOPMANS J. W. KLUITENBERG G. J. VALENTE, A. Multi-functional probe for small-scale simultaneous measurements of soil thermal, water content, and electrical conductivity. *Sensors and actuators. A, Physical*, vol. 132:pp. 70–77, 2006.
- [27] HOPMANS J. W. MORTENSEN A. P. KLUITENGERG G.J. MORI, Y. Multifunctional heat pulse probe for simultaneous measurement of soil water content, solute concentration, and heat transport parameters.). *Vadose Zone Journal*.
- [28] MORAIS R. COUTO C. CORREIA J. H. VALENTE, A. Modeling and simulation of silicon soil moisture sensor based on the dphp method for agriculture. *EUROPEAN CONFERENCE* ON SOLID-STATE TRANSDUCERS, Eurosensors XVII : book of abstracts:p. 564–567.
- [29] MORAIS R. COUTO C. CORREIA J. H. VALENTE, A. Modeling, simulation and testing of silicon soil moisture sensor based on the dual-probe heat-pulse method. *Sensors and actuators*. *A, Physical*, vol. 115:pp. 434–439, 2004.
- [30] REICHARDT K. MALAVOLTA E. BACCHI O. O. S. CALVACHE, A. M. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso da água em uma cultura de feijão.). Scientia Agricola, vol. 54, 1997.
- [31] M. P. TIMKO. A two-terminal ic temperature transducer.). *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*, VOL. SC-11, 1976.
- [32] CAMPBELL G. S. ELLET K. M. CALISSENDORF C. FLINT, A. L. Calibration and temperature correction of heat dissipation matric potential sensors.). *Soil Science Society of America Journal*, vol. 66:1439–1445, 2002.
- [33] PAZ V. P. S. COELHO E. F. FILHO M. A. C. SANTANA G. S. SILVA, T. S. M. Condutividade elétrica da solução de solo em função da condutividade elétrica aparente e da umidade do solo sob aplicação de cloreto de potássio com o uso da reflectometria no domínio do tempo. *Revista Irriga*, vol. 10, 2005.
- [34] C. Donfack. Caracterisation de contacts electrodes-tissus pour les stimulateursneuromusculaires implantables. *Dissetação de Mestrado, Escola Politécnica de Montreal*, 2000.
- [35] Kilowatt Classroom. Resistance Measurements Three and Four-Point Method . Página na internet, julho 2007. "http://www.kilowattclassroom.com/".
- [36] Digital Ground Resistance Tester, Models 4620,4630. Digital Ground Resistance Tester, Models 4620,4630. Página na internet, julho 2007. "http://www.testequipmentdepot. com/".
- [37] WILLY M. C. SANSEN SIK LUI STEFAN P. ROBERT, G. MEYER. The differential pair as a triangle-sine wave converter. *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*, v.11:p. 418420, 1976.
- [38] Instrumentation amplifier. Burr-Brow Corporation, 1998.

- [39] PFRIMER F. D. DIAS J. A. S. FERREIRA E. C. ROQUE, W. A four terminal multi-purpose proble for measurements of electrical conductivity, water content and temperature. Aceito: International Conference of Agricultural Engineering, XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 31 de agosto a 4 de setembro, 2008, Foz do Iguaçu, PR, Brasi.
- [40] PFRIMER F. D. ROQUE W. FERREIRA E. C. DIAS, J. A. S. An automatic data acquisition system for characterization and calibration of soil humidity and electric conductivity sensor using labview. Aceito: Induscon, VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, 17 de agosto a 20 de agosto, 2008, Poços de Caldas, M.G., Brasil., 2008.
- [41] ROQUE W. DIAS J. A. S. FERREIRA E. C. PFRIMER, F. D. An automatic calibration system for eletronic soil moisture sensors. Aceito: International Conference of Agricultural Engineering, XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 31 de agosto a 4 de setembro, 2008, Foz do Iguaçu, PR, Brasi, 2008.