

PROTÓTIPO DE UM SENSOR CAPACITIVO AUTOMÁTICO PARA MONITORAR A UMIDADE DO SOLO

Anaximandro Rende

Milton Biage

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila 2160, Campus Santa Mônica, Uberlândia, MG, 38400-902, Brasil, E-mail: arende@mecanica.ufu.br

Resumo

A adoção de tecnologia é uma imposição inquestionável à atividade agrícola. Este trabalho tem como objetivo caracterizar um sensor de umidade capacitivo, utilizado para monitorar a umidade do solo. São avaliados sensores capacitivos com dielétricos construídos com pedra pomes ($R_d = 0,4$ e $R_d = 0,8$) e amostra de solo ($R_d = 0,8$ e $R_d = 1,0$), sendo o parâmetro R_d um fator geométrico que relaciona a distância entre as placas do capacitor e o raio das mesmas. Os sensores são instalados em recipientes de PVC, preenchidos com solo. O conjunto é umedecido por capilaridade e submetido a secagem lenta e natural. As leituras são tomadas diariamente. São obtidas curvas que relacionam a capacitância elétrica do sensor com a umidade presente no solo. Os ensaios são realizados em três solos diferentes. Os resultados permitem inferir que os sensores com maiores dimensões apresentam maior sensibilidade quando comparados com os sensores menores.

Palavras-chave: Sensores capacitivos, Instrumentação agrícola, Umidade do solo.

1. INTRODUÇÃO

A irrigação é necessária para o desenvolvimento de várias culturas agrícolas, em locais onde a disponibilidade de água é precária. O uso da água deve ser otimizado, de modo que a cultura tenha somente o suficiente para o seu crescimento, com o mínimo desperdício. Mesmo nas áreas onde há abundância de água, os elevados custos dos fertilizantes e da mão de obra estão fazendo com que o agricultor procure maneiras de melhorar a eficiência da irrigação agrícola (Carter & Conway, 1984).

Um dos aspectos da irrigação que tem recebido o interesse de todos é o que se refere ao tempo de sua utilização e a quantidade de água a ser aplicada. Muitos agricultores aplicam irrigações sem conhecer as necessidades reais da cultura (Dantas & Rao, 1994). Este fato tem ocasionado impactos ambientais adversos ao solo, à disponibilidade e qualidade da água, à saúde pública, à fauna e a flora, e alguns casos, às condições sócio-econômicas da população local. Portanto é necessário quantificar, com precisão, a magnitude do impacto ambiental ocasionado pela irrigação, para que possa ser considerado na execução e manejo dos projetos (Bernardo, 1998).

A determinação da umidade nos solos (ao nível das raízes) pode ser realizada através de dois métodos básicos. O primeiro é um processo de transformação direta, no qual, por exemplo, o solo é pesado e seco, quantificando-se a umidade propriamente dita. Geralmente

são utilizados métodos laboriosos em laboratórios, o que vem a ser uma limitação quando se deseja melhorar a operacionalidade de um sistema de irrigação. No segundo, relaciona-se a variação de uma grandeza física (pressão, resistência elétrica, capacitância elétrica, por exemplo) com a variação da umidade que se quer determinar.

O sensor de umidade desenvolvido e caracterizado para esta finalidade, é constituído basicamente por um conjunto de duas placas condutoras, separadas por um dielétrico. A capacitância pode ser definida, desde que a área das placas do capacitor seja muito maior que a distância entre as mesmas, como sendo (Hayt, 1983):

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

onde ϵ é a permissividade elétrica do meio, A é a área da placa do capacitor e d é a distância entre as placas do capacitor.

Através da Eq. 1, é possível inferir que a capacitância depende exclusivamente do meio dielétrico existente entre as placas do capacitor e das dimensões do mesmo. Neste trabalho, utilizou-se a variação do meio dielétrico presente entre as placas do capacitor para monitorar a variação do teor de umidade no solo.

Assim, a medida que o solo ao redor do sensor torna-se mais úmido, o meio poroso que compõe o dielétrico absorve uma determinada quantidade de água, proporcional à umidade presente no substrato, até atingir-se a condição de equilíbrio. Analogamente, quando o solo torna-se mais seco, o meio dielétrico perde água em função da umidade presente ao redor do sensor. Este comportamento deve-se ao fato de que a água, como qualquer matéria da natureza tende, espontaneamente, a assumir um estado mínimo de energia, procurando equilíbrio com o meio ambiente. No solo, o movimento hídrico é caracterizado pela movimentação da água de uma região saturada (elevado potencial) para uma região seca (baixo potencial), sempre em busca de um nível de energia inferior (Reichardt, 1985).

Portanto, ao se atingir a condição de equilíbrio, a capacitância pode ser considerada como um indicador do teor de água no solo. Entretanto, o valor de umidade do solo deve ser obtido a partir de uma curva de calibração, visto que, o equilíbrio entre o sensor e o solo é o equilíbrio existente entre os potenciais matriciais e não entre os teores de umidade (Gomide, 1998). Como solos diferentes possuem diferentes curvas de retenção de água, existem diferenças entre as curvas que relacionam a resposta elétrica do sensor com o teor de umidade em diferentes solos (Rende, 1999).

O objetivo deste trabalho é caracterizar o comportamento de sensores de umidade capacitivos, construídos com diferentes dielétricos e dimensões, para o monitoramento da umidade de solos irrigados.

2. SENSOR DE UMIDADE CAPACITIVO

Para realizar os ensaios experimentais, foram construídos diferentes tipos de sensores. Utilizou-se chapas de cobre com 2 mm de espessura, cortadas em diâmetros pré-estabelecidos, originando-se assim as placas do capacitor. Como material poroso, compondo o dielétrico do sensor, utilizou-se amostra do próprio solo (Fig. 1a) e pedra pomes (Fig. 1d). Nos sensores construídos com dielétrico de amostra de solo utilizou-se uma variação quanto a posição dos segmentos de tecnil nas placas do capacitor. Nos sensores de maiores dimensões foram utilizados quatro segmentos de tubos de tecnil (Fig. 1b), e nos sensores menores, três segmentos de tecnil (Fig. 1c).

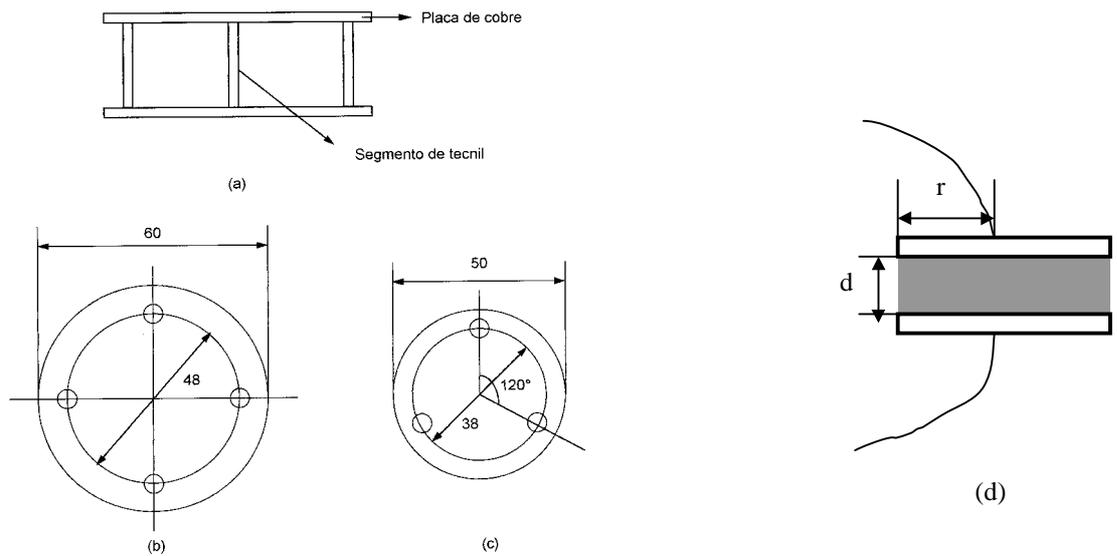


Figura 1. Diagrama esquemático ilustrando a geometria dos sensores.

Na Tabela 1 são mostradas as principais características de cada sensor construído. Nesta tabela, o parâmetro R_d é definido como sendo a razão existente entre a dimensão da distância entre as placas do capacitor e o raio das mesmas (Eq. 2).

$$R_d = \frac{d}{r} \quad (2)$$

onde d é a distância entre as placas do capacitor e r o raio das mesmas.

Tabela 1. Principais características dos sensores construídos

Sensor	Dielétrico	Raio (r) - (mm)	Distância (d) - (mm)	$R_d = d/r$
1	Pedra pomes	12,5	5	0,4
2	Pedra pomes	25,0	20	0,8
3	Amostra de solo	25,0	20	0,8
4	Amostra de solo	30,0	30	1,0

Este parâmetro, R_d , permite analisar a influência da geometria dos sensores capacitivos sobre o comportamento dos mesmos. Assim, as variações estabelecidas nas dimensões dos sensores tem como objetivo permitir que os resultados sejam comparados e avaliados, verificando-se as influências do aspecto geométrico sobre o comportamento do meio dielétrico do sensor.

Um outro ponto a ser considerado com relação a utilização de um capacitor como sensor de umidade de solo, trata-se da necessidade de que o sensor (capacitor) faça parte de um circuito elétrico, onde as variações da capacitância, devidas à alteração da quantidade de água presente no solo, sejam refletidas em valores de tensão elétrica.

Na Fig. 2 é representado o circuito elétrico equivalente utilizado nos ensaios. Neste circuito R_m representa um divisor de tensão, cujo valor foi fixado em 470 K Ω ; R_s é a resistência associada ao capacitor; C_{pm} é a capacitância do meio poroso, sendo o seu valor constante; C_s é a capacitância do líquido presente no interior do meio poroso do sensor, que é função da umidade do sensor.

O circuito foi alimentado por meio de corrente alternada (AC), com uma fonte senoidal de amplitude de 9 volts e frequência de excitação de 2KHz. Com a utilização desta frequência obtém-se a máxima excitação do sensor, sem que ocorra atenuação do sinal do mesmo (Rende & Biage, 2000).

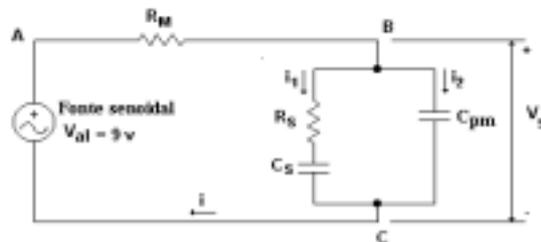


Figura 2. Circuito de alimentação do sensor

3. CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE CAPACITIVO

Para avaliar e caracterizar o desempenho dos sensores em diferentes condições de operação foram realizados ensaios em solos que apresentavam texturas distintas (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da análise de textura de três solos da Bacia do Bom Jardim, no município de Uberlândia – MG.

Solo	Areia Grossa	Areia fina	Silte	Argila
A	51	36	01	12
B	23	26	04	47
C	06	06	09	79

O método utilizado neste experimento foi semelhante ao descrito por Rende e Biage (2000). Consistiu em enterrar o sensor em um recipiente de PVC, preenchido com solo seco em estufa 105° - 110°C. O conjunto foi então umedecido com água por capilaridade por um período de 24 horas, até atingir a saturação, sendo, então colocado sobre um suporte para que ocorresse o processo de secagem. As leituras de tensão do sensor foram diárias, sendo utilizado um osciloscópio Tektronix de 200 MHz. O conjunto também foi pesado diariamente. Para tanto, utilizou-se uma balança eletrônica com resolução de 0,01 grama. A determinação do teor de umidade do solo foi determinado através da Eq. 3.

$$U\% = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_3} \times 100 \quad (3)$$

onde U% é a porcentagem de umidade com base em peso seco, P₁ é o peso da amostra úmida, P₂ o peso da amostra seca e P₃ o peso do recipiente. O peso da amostra seca foi obtido antes do início de cada ensaio. Em cada experimento, o sensor foi pesado para que o seu peso pudesse ser desconsiderado nos resultados.

Para analisar o desempenho do sensor ensaiado, verificou-se a variação da capacitância elétrica com o teor de umidade do solo. A capacitância foi calculada a partir da Eq. 4, definida como:

$$C = \frac{1}{2\pi f Z_c j} \quad (4)$$

onde C é a capacitância elétrica, f a frequência de excitação do circuito em Hertz e Z_c é a impedância do circuito.

Com os dados obtidos, construiu-se as curvas para cada tipo de solo e sensor ensaiado, relacionando-se o teor de umidade com a capacitância do sensor. Os resultados experimentais obtidas são apresentadas a seguir.

3.1 Sensor com dielétrico de pedra pomes

No primeiro experimento, utilizou-se o sensor 1 instalado nos três tipos de solos. Com o objetivo de verificar a influência do fator geométrico no comportamento do sensor, também foram realizados ensaios com o sensor 2.

Segundo os resultados apresentados por Rende (1999), é possível inferir que a variação da tensão no sensor deve-se quase que exclusivamente ao potencial matricial. Este fato concorda com a teoria, visto que sensores capacitivos quando instalados no solo entram em equilíbrio com o potencial matricial do solo e não com o teor de umidade presente no solo.

Para melhor analisar o desempenho dos sensores testados, verificou-se a variação da capacitância elétrica do sensor com a umidade do solo. Os resultados são apresentados na Fig.3. Verifica-se que somente nos ensaios conduzidos em areia quartzosa há uma relação quase linear entre a capacitância e o teor de umidade presente no solo, como sugerido pela Eq. 1. Este comportamento, deve-se ao fato de que, em solos arenosos onde há predominância de água livre, a constante dielétrica que é medida pela capacitância, é diretamente proporcional ao conteúdo de água presente no solo (Gomide, 1998).

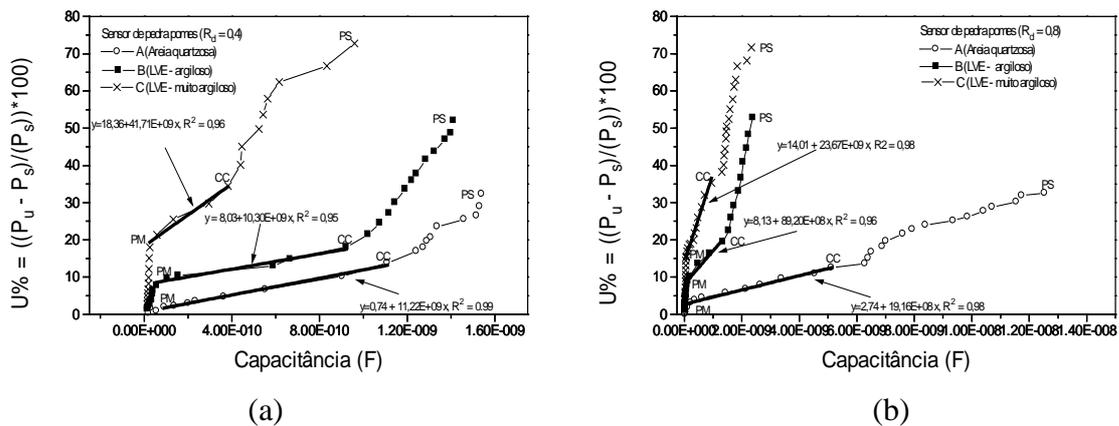


Figura 3. Relação entre a capacitância e a porcentagem de umidade com base em peso seco presente no solo para o sensor construído com dielétrico de pedra pomes. (a) $R_d = 0,4$ e (b) $R_d = 0,8$. (PS = Ponto de Saturação, CC = Capacidade de Campo, PM = Ponto de Murcha Permanente)

Um outro ponto a ser considerado é que nas curvas apresentadas na Fig. 3, no intervalo compreendido entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PM), a relação entre a capacitância e o teor de umidade presente no solo é linear. Esta região constitui a de maior interesse para a agricultura, pois, é neste intervalo que se situa a água disponível para o desenvolvimento das plantas. Considerando este fato, pode-se afirmar que os sensores capacitivos são adequados para monitorar o teor de umidade presente no solo em um dado instante, devido a ele apresentar uma relação linear entre a capacitância fornecida pelo sensor e o teor de umidade no solo na região útil, na qual há necessidade de controlar a disponibilidade de água para o perfeito desenvolvimento das plantas.

Nesta região, além da vantagem da resposta do sensor ser linear, também, este apresenta uma boa sensibilidade. Quando se tem uma curva de calibração que relacione o sinal de entrada, V_{sensor} ou capacitância, com o sinal de saída, porcentagem de umidade, como apresentado na Fig.3, a sensibilidade do instrumento pode ser definida como sendo a inclinação da curva de calibração (Doebelin, 1983). Isto é:

$$S = \frac{\Delta q_o}{\Delta q_i} \quad (5)$$

onde S é a sensibilidade, Δq_o é a variação do sinal de saída e Δq_i é a variação do sinal de entrada.

Portanto ao se observar as curvas apresentadas na Fig. 3, no intervalo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, tem-se que a inclinação da reta para a região é dada por $dU\%/dC$, onde $dU\%$ representa a variação do sinal de entrada do sensor e dC é a variação do sinal de saída do sensor. Contudo a sensibilidade do sensor é dada como sendo $dC/dU\%$, assim tem-se que:

$$S = \frac{1}{dU\%/dC} \quad (6)$$

Através da Eq. 6 é possível calcular a sensibilidade dos sensores. As sensibilidades são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Sensibilidade dos sensores de pedra pomes na região entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PM)

Sensor	R_d	S em areia quartzosa	S em solo argiloso	S em solo muito argiloso
1	0,4	0,89E-10	0,91E-10	0,24E-10
2	0,8	5,22E-10	1,12E-10	0,42E-10

Como pode ser observado através da Tabela 3, o sensor 1 apresentou sensibilidades aproximadamente iguais em areia quartzosa e em solo argiloso, e uma menor sensibilidade em solo muito argiloso. Através destes resultados é possível verificar que a sensibilidade deste sensor não é função única e exclusiva do teor de umidade do solo, pois, no intervalo compreendido entre CC e PM, a quantidade de água presente é sensivelmente mais elevada no solo muito argiloso, quando comparada com o solo argiloso e a areia quartzosa.

A sensibilidade do sensor está relacionada com a água livre presente no solo. Devido a polaridade da molécula de água, esta tende a ser atraída pelas partículas de argila presente no solo, e conseqüentemente, há uma competição pela água entre o solo e o sensor (Brady, 1989). Em solos arenosos, no caso em estudo a areia quartzosa, esta competição é minimizada, e conseqüentemente há o predomínio de água livre nestes solos, o que resulta em uma maior sensibilidade do sensor.

As sensibilidades obtidas com o sensor 2, apresentaram maiores valores para o solo de areia quartzosa e diminuem a proporção em que o solo torna-se mais argiloso. Este fato é mais evidente que o observado pelo sensor 1.

Outro fator importante a ser considerado, trata-se de que os sensores construídos com dielétrico de pedra pomes com $R_d = 0,8$, apresentam uma maior sensibilidade nos três tipos de solos utilizados, quando comparados com o sensor de pedra pomes com $R_d = 0,4$.

Isto deve-se ao fato do sensor de pedra pomes com $R_d = 0,4$, apresentar um comportamento do campo elétrico com características quase tridimensionais, devido a pequena razão existente entre a distância das placas do capacitor e o diâmetro das mesmas, induzindo um efeito de bordas no comportamento do sensor, que, intuitivamente, pode ser significativo. Assim, conjectura-se que o sensor 2, apresenta dimensões adequadas para um sensor capacitivo, cujo comportamento apresenta características bidimensionais.

3.2 Sensor com dielétrico de amostra de solo

Neste segundo grupo de ensaios, utilizou-se sensores construídos com dielétrico de amostra de solo, os quais foram constituídos em cada experimento pelo próprio solo a ser analisado. Por exemplo, nos ensaios conduzidos em areia quartzosa, utilizou-se como dielétrico do sensor a própria areia quartzosa. Foram testados os sensores 3 e 4.

Na Fig. 4, são plotados os gráficos que relacionam a porcentagem de umidade com base em peso seco do solo e capacitância elétrica dos sensores.

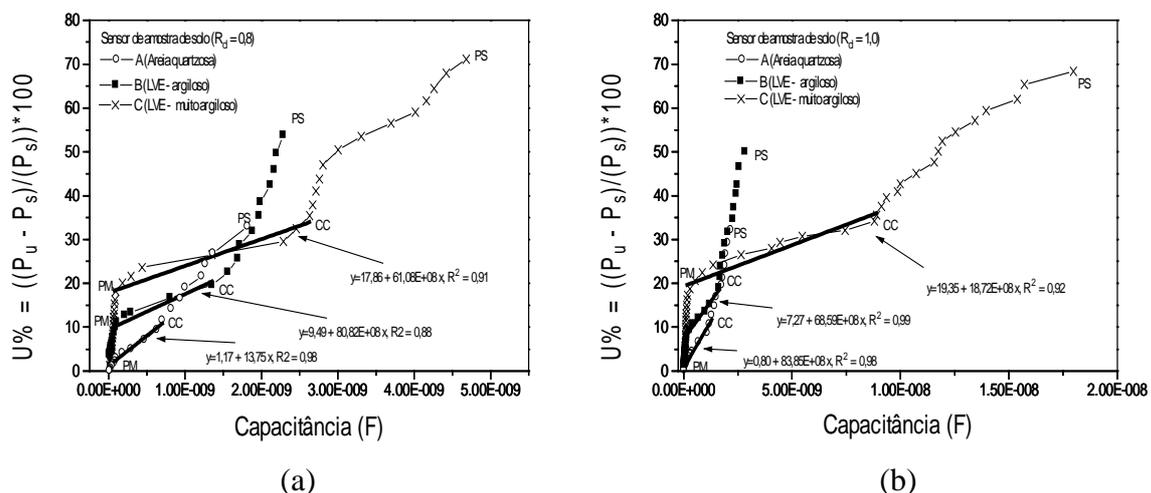


Figura 3. Relação entre a capacitância e a porcentagem de umidade com base em peso seco presente no solo para o sensor construído com dielétrico de pedra pomes. (a) $R_d = 0,4$ e (b) $R_d = 0,8$. (PS = Ponto de Saturação, CC = Capacidade de Campo, PM = Ponto de Murcha Permanente)

Considerando-se as inclinações dadas pelas curvas de ajuste para a região entre o ponto de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PM), e utilizando-se a Eq. 6, obtém-se as sensibilidades apresentadas pelo sensores de amostra de solo. As sensibilidades dos sensores são apresentadas na Tabela 4.

É possível observar pela Tabela 4, que os sensores apresentam maior sensibilidade nos ensaios conduzidos em solo muito argiloso e diminui gradualmente quando os solos se tornam mais arenosos. Como já evidenciado anteriormente, na região compreendida entre CC e PM, a sensibilidade do sensor é determinada pela água livre presente no solo, que é menor em solos com elevados teores de argila. Mas esta consideração é válida quando são utilizados sensores construídos com dielétricos de meios porosos diferentes do solo, como por exemplo pedra pomes. Neste caso há competição pela água presente no solo entre o sensor e o próprio solo. Esta competição é mais acentuada em solos com elevados teores de argila, com conseqüente diminuição da sensibilidade do sensor.

Quando utilizados sensores com dielétricos de amostras do próprio solo, esta competição é inexistente e portanto devido a maior presença de água no sensor de solo muito argiloso, este apresenta uma maior sensibilidade quando comparado com os demais.

Tabela 4. Sensibilidade dos sensores de amostra de solo na região entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PM).

Sensor	R_d	S em areia quartzosa	S em solo argiloso	S em solo muito argiloso
3	0,8	0,73E-11	1,24E-10	1,64E-10
4	1,0	1,16E-10	1,46E-10	5,34E-10

De modo semelhante aos sensores de pedra pomes, estes sensores de amostra de solo apresentaram maiores sensibilidades com o aumento do fator R_d . A argumentação para tal comportamento é a mesma apresentada anteriormente para os sensores de pedra pomes, relacionada com as características geométricas destes. Portanto, no caso do sensores de dielétrico de amostra de solo com $R_d = 0,8$, os efeitos de bordas são mais significativos, diminuindo a homogeneização na distribuição do teor de água no sensor, mascarando, assim, a sensibilidade do sensor, pois existe uma maior interferência na relação entre o teor de água no solo e a capacitância. Este efeito é menos significativo quando os sensores apresenta R_d maiores.

Com base nos resultados obtidos, pode-se inferir que os sensores capacitivos testados neste trabalho, podem ser utilizados com sucesso no monitoramento da umidade do solo, sendo necessário para tanto, o levantamento de curvas de calibração específica para cada tipo de solo.

Como já mencionado, a utilização de métodos que relacionam uma grandeza física, no caso a capacitância, com a variação da umidade que se deseja determinar apresenta algumas vantagens em relação aos outros métodos existentes. Estes procedimentos permitem o monitoramento em tempo real da umidade do solo, e também possibilitam a determinação da água que está prontamente disponível para o desenvolvimento das plantas.

4. CONCLUSÕES

Desenvolveu-se este trabalho com o intuito de compreender o funcionamento de sensores capacitivos construídos com diferentes dielétricos. Foram levantadas curvas que relacionam a capacitância dos sensores em função da porcentagem de umidade com base em peso seco presente no solo, para três tipos de solos e para sensores com diferentes dielétricos e características geométricas. Estas curvas permitiram obter as sensibilidades dos sensores e os intervalos de teor de umidade do solo que os sensores possuem um comportamento linear.

Todos os sensores, independente do meio dielétrico utilizado e de sua dimensão, apresentaram uma relação linear entre a capacitância elétrica fornecida pelos sensores e os teores de umidade do solo, no intervalo compreendido entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PM). Nesta região, os sensores de maiores dimensões apresentaram maiores sensibilidades, quando comparados com os menores.

Outro aspecto importante que os resultados permitiram inferir, é que, a sensibilidade dos sensores de pedra pomes é determinada pela água livre presente no solo, que pode ser considerada função da presença de argila no solo. Este fato é válido somente quando são utilizados sensores construídos com dielétricos de meios porosos diferentes do solo. Neste caso há competição pela água presente no solo entre o sensor e o próprio solo, sendo mais acentuada em solos com elevados teores de argila, com conseqüente diminuição da sensibilidade do sensor.

Também é importante salientar que o comportamento dos sensores capacitivos é característico para cada tipo de solo, sendo necessário levantar uma curva de calibração específica para cada solo.

5. REFERÊNCIAS

- Bernardo. S., 1998, "Irrigação e produtividade", Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Poços de Caldas, MG, Brasil, pp. 117-132.
- Brady, N. C., 1989, "Natureza e propriedades dos solos" – 7ª ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos. 878 p.
- Carter, V. H. e Conway, S., 1984, "Como predizer datas e dados sobre a irrigação com medidor de umidade de partículas de nêutrons", ITEM – Irrigação e Tecnologia Moderna, 18 : 14-20.
- Dantas, R., T. e Rao, T., V., R., 1994, "Monitoramento da deficiência hídrica na cultura do milho com o termômetro infravermelho", Pesq. Agropec. Bras. Brasília, v. 29, nº 11, pp. 1743-1749.
- Doebelin, O., E., 1983, "Generalized performance characteristics of instruments", In: Measurement systems: Application and design, - 3º ed. McGraw-Hill, pp. 37-210.
- Gomide, R. L., 1998, "Monitoramento para o manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos", Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Poços de Caldas, MG, Brasil, pp. 133-216.
- Hayt, W., H., Jr., 1983, "Eletromagnetismo", 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.
- Reichardt, K., 1985, "Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera", - 4ª ed., Campinas, Fundação Cargill, 445 p.
- Rende, A. e Biage, M., 2000, "Characterization of capacitive sensors for measurements of the humidity in irrigated soils". Revista Brasileira de Ciências Mecânicas. In print.
- Rende, A., 1999, "Desenvolvimento de um protótipo para monitorar a umidade do solo: qualificação do comportamento de um sensor capacitivo". Tese de Mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica de Uberlândia :UFU, 103 p.