

## CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES CAPACITIVOS PARA MEDIÇÃO DA UMIDADE EM SOLOS IRRIGADOS

**Anaximandro Rende**

**Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica.**

**Milton Biage**

**Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica.**

**Resumo.** A irrigação é uma técnica desenvolvida para suprir a necessidade hídrica das plantas. A utilização da água deve ser otimizada de modo que a cultura tenha apenas o suficiente para o seu crescimento, evitando desperdício. O objetivo deste trabalho é caracterizar o comportamento de um sensor de umidade capacitivo para monitorar a umidade presente nos solos. Em primeira instância, são avaliados sensores com dielétricos construídos de 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 com o raio das mesmas. São instalados sensores em cilindros de PVC, preenchidos com solo. O conjunto é umedecido por capilaridade e submetido a secagem lenta e natural. As leituras são tomadas diariamente, seguidas de pesagens. São obtidas as curvas relacionando a porcentagem de umidade com base em peso seco presente no solo com a tensão elétrica fornecida pelo sensor. Os ensaios são realizados em areia quartzosa e em latossolo vermelho escuro. Os resultados obtidos permitem inferir que o comportamento dos sensores é característico em cada solo, sendo portanto, necessário o desenvolvimento de curvas de calibração próprias.

**Palavras-chave:** Automação, Instrumentação agrícola, Sensor capacitivo.

### 1. INTRODUÇÃO

A constante elevação dos custos de produção agrícola e a necessidade de produtos agrícolas em quantidade cada vez maior e a preços compatíveis com o mercado consumidor, vêm fazendo com que o homem desenvolva meios e equipamentos adequados para uma agricultura eficiente e rentável. Uma das técnicas desenvolvidas, com esse objetivo, é a irrigação. A irrigação é uma prática agrícola que completa a chuva, quando esta é insuficiente para atender às exigências hídricas das culturas, além de permitir a incorporação de novas áreas à agricultura, que sem o uso da irrigação não seriam possíveis de serem cultivadas.

A exploração agrícola em áreas irrigadas possibilita uma maior produtividade quando comparada com às áreas de sequeiro (Siqueira *et al.*, 1987), e também, praticamente acaba com as incertezas próprias da agricultura, totalmente, dependente do clima (Spinoza e Lins, 1986). A deficiência de água é, normalmente, o fator mais limitante à obtenção de elevadas produtividades (Marouelli *et al.*, 1996). Segundo Cardoso (1998), os produtos obtidos nestas áreas são de melhor qualidade e possuem um maior valor comercial. Hoje, a área irrigada no mundo corresponde a 17% do total agricultado e é responsável por 40% de produção total de alimentos. O Brasil demonstra um grande potencial na expansão de sua agricultura irrigada. Atualmente apenas 5% de sua área cultivada é irrigada, respondendo por 16% da produção agrícola total e por 35% do valor financeiro dessa produção (Santos, 1998).

Apesar dos grandes benefícios proporcionados pela irrigação existem evidências que grandes áreas irrigadas, têm-se tornado impróprias à agricultura com o passar do tempo. A irrigação tem ocasionado impactos ambientais adversos ao solo, à disponibilidade e qualidade da água, à saúde pública, à fauna e a flora, e em alguns casos, às condições sócio-econômicas da população local. É necessário que a irrigação seja implementada de modo que seus benefícios não sejam ilusórios ou momentâneos, mas sob o enfoque de desenvolvimento sustentado, gerando benefícios a curto, a médio e a longo prazo, sem degradar o solo e o meio ambiente (Bernardo, 1998).

A quantidade de água a ser aplicada e quando aplicá-la são questões fundamentais a serem respondidas (Camargo e Pereira, 1990). A determinação da quantidade de água necessária é definido de acordo com cada tipo de cultura e em um determinado período de tempo, de modo a não limitar o crescimento da planta e a produção desta sob às condições climáticas locais (Bernardo, 1995).

As estratégias a serem adotadas no manejo das irrigações são fundamentadas em dados referentes ao clima, à planta e ao solo, ou na combinação de dois ou três desse tipos de dados. De modo geral, os dados obtidos a partir de observação das condições existentes no solo, relacionadas com o teor de água, são utilizados para indicar o momento de irrigar e os dados obtidos a partir do clima e da planta determinam a lâmina de água a ser aplicada (Andrade *et al*, 1998).

Os elementos climáticos podem ser amplamente utilizados na determinação da necessidade hídrica das plantas, baseando-se na estimativa da evapotranspiração. A taxa de evapotranspiração, definida por Sedyama *et al.* (1998) como sendo a quantidade de água transpirada pela planta, mais a água evaporada diretamente da superfície do solo ou da superfície da planta, pode ser uma indicadora da necessidade de água na irrigação.

Nessa transferência de vapor de água, os elementos do clima controlam a força da demanda hídrica da atmosfera, que atua no contínuo solo-planta-atmosfera, como um dreno. A automação dessas medições em tempo real, facilita a obtenção da evapotranspiração e, conseqüentemente, permite estabelecer estratégias de uso aos sistemas agrícolas (Gomide, 1998).

A medida direta de alguns parâmetros relacionados às plantas, também, têm sido utilizada na programação da irrigação, ou seja, na determinação de quando e quanto de água aplicar. Dentre os parâmetros utilizados, os que possuem maior importância são: a medida do diâmetro do caule, a dissipação térmica, a temperatura da cobertura vegetal e a reflectância.

Por último, tem-se os modelos que se baseiam em dados obtidos a partir da relação solo-água como indicador de deficiência hídrica. A determinação quantitativa da água no solo pode ser realizada através de dois métodos básicos. O primeiro é um processo de transformação direta, no qual, o solo é seco e pesado, sendo utilizado métodos de laboratório, 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 (resistência elétrica, capacitância) com a variação da umidade que se quer determinar.

Dentre deste enfoque, este trabalho tem como objetivo caracterizar o comportamento de sensores de umidade capacitivos, construídos com diferentes dielétricos e dimensões, para o monitoramento da umidade em solos irrigados. A escolha de um sensor capacitivo deve-se ao fato de que o mesmo é pouco influenciado pela temperatura, concentração química da água e possui um tempo de resposta relativamente rápido. Outro fato que motivou o desenvolvimento da pesquisa voltada para a agricultura é o fato de haver carência de tecnologias nesta área e a forte demanda que se constará no futuro devido a necessidade de aumentar a produção de alimentos.

## **2. SENSOR DE UMIDADE CAPACITIVO**

### **2.1. Princípio de funcionamento**

A capacitância elétrica tem sido muito empregada em um grande variedade de sensores utilizados para caracterizar uma grandeza variante no tempo. Segundo desenvolvimento matemático

apresentado por Pinto (1997), a capacitância elétrica pode ser definida, desde que a área das placas do capacitor seja muito maior que a distância entre as mesmas, como sendo:

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

onde  $\epsilon$  é a permissividade elétrica do meio,  $S$  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 no interior das placas do capacitor e das dimensões do capacitor. Desta forma, tanto a variação da permissividade elétrica do meio,  $\epsilon$ , como a variação da distância,  $d$ , entre as placas do capacitor podem ser utilizados para acompanhar a variação de uma grandeza variante com o tempo.

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. Como visto pela “Eq. (1)”, o valor da capacitância do sensor varia linearmente com a permissividade elétrica do meio, uma vez que a distância entre as placas do capacitor e a área das mesmas são constantes. Deste modo, a resposta elétrica do sensor depende exclusivamente das variações ocorridas no meio dielétrico.

Assim, utilizando-se um capacitor não lacrado, que possui como dielétrico um meio poroso, a variação da capacitância depende exclusivamente do tipo e da quantidade de matéria presente entre as placas, uma vez que os demais parâmetros que influenciam no valor da capacitância podem ser considerados constantes. Deste modo, 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. No solo, o movimento hídrico é caracterizado pela movimentação de água de uma região saturada (elevado potencial) para uma região seca (baixo potencial), sempre em busca de um nível de energia inferior.

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. Este tipo de sensor, que tem sua impedância variando na mesma proporção da grandeza a ser medida, necessita de um esquema de divisão de tensão elétrica, para que a variação da mesma possa ser detectada. Em todos os ensaios realizados com os sensores, o valor do divisor de tensão foi fixado em 470 K $\Omega$ . Desta forma foi montado um circuito elétrico semelhante ao descrito por Pinto (1997), como apresentado na “Fig 1”.

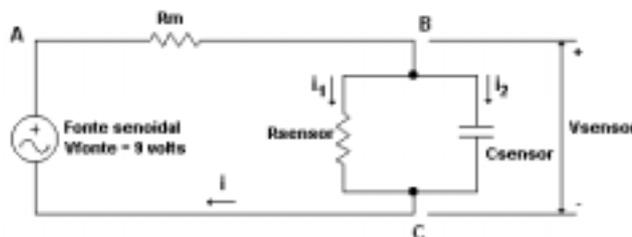


Figura 1 - Circuito básico que compõe o sensor capacitivo, evidenciando a distribuição da corrente elétrica e tensão na malha.

O circuito foi alimentado com corrente alternada (AC), com uma forma de onda senoidal com amplitude de 9 volts e frequência de excitação de 2 KHz. A escolha desta frequência, deve-se ao fato de que neste ponto é obtida a máxima frequência de excitação para o sensor, sem que ocorra atenuação no sinal gerado pelo mesmo. Este fato pode ser verificado através da “Fig.2”.

Na “Fig.2” é mostrada a relação entre a tensão média fornecida pelo sensor em função da frequência de excitação, considerando que a alimentação do circuito é realizada por uma fonte senoidal, com amplitude de 9 volts. Nos resultados apresentados no gráfico da “Fig.2”, a capacitância do sensor mantém-se constante, portanto a mudança da tensão de saída fornecida pelo sensor, varia única e exclusivamente, em função da frequência de excitação. Portanto, procurou-se excitar os sensores nos experimentos realizados ao longo deste estudo, com a maior frequência de excitação possível, sem que, contudo, ocorra atenuação da amplitude do sinal de saída com relação ao sinal de entrada, devido as características de excitação. Neste caso, esta máxima frequência de excitação é de 2000 Hz, conforme apresentado na “Fig.2”.

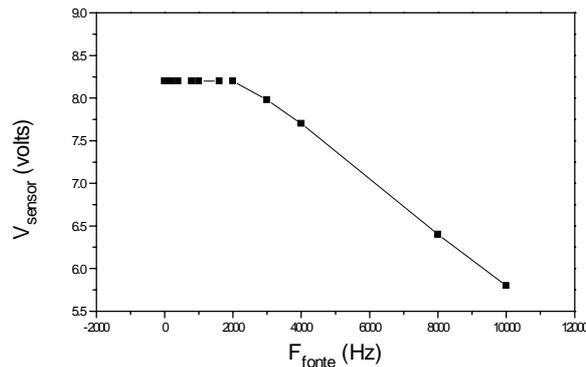


Figura 2 - Curva relacionando a tensão fornecida pelo sensor e a frequência de excitação do sensor.

Contudo, uma melhor compreensão sobre o comportamento do circuito mostrado na “Fig. 1, pode ser alcançada através do cálculo analítico da função de transferência do circuito “Eq. 2”.

$$G(s) = \frac{V_{\text{sensor}}}{V_{\text{fonte}}} = \frac{1}{\left[ \left( 1 + \frac{R_m}{R_{\text{sensor}}} \right) + R_m C_{\text{sensor}} S \right]} \cong \frac{1}{(1 + \tau_c \omega j)} \quad (2)$$

onde  $S = \omega j$  e  $\tau_c = R_m C_{\text{sensor}}$  é a constante de tempo que caracteriza a resposta do sistema e  $\omega$  é a velocidade angular de excitação do sensor.

Na aproximação realizada na “Eq. (2)” considera-se que  $R_{\text{sensor}} \gg R_m$ , o que permite caracterizar o sistema como um sensor capacitivo.

Portanto, ao se analisar a função transferência dada pela “Eq. (2)”, conclui-se que o sistema trata-se de um filtro passa-baixo de primeira ordem.

## 2.2. Esquema de construção dos sensores

Para realizar os ensaios experimentais, foram construídos diferentes tipos de sensores. Para tanto utilizou-se chapas de cobre com 2 mm de espessura que foram cortadas em diâmetros pré estabelecidos, originando assim as placas constituintes do capacitor. Utilizou-se como material poroso, compondo o meio dielétrico do sensor, pedra pomes sintética e amostras do próprio solo. A pedra pomes utilizada, comumente encontrada no comércio, é constituída, segundo o fabricante por água, cimento, cal, areia e pó de alumínio.

As placas de cobre foram revestidas com um verniz protetor. Este revestimento teve dois propósitos. O primeiro, evitar que ocorresse a oxidação das placas de cobre em contato com o solo. O segundo, e mais importante, eliminar o possível efeito de condução de cargas elétricas através do

meio dielétrico que pode ocorrer dependendo da condutividade da água no solo. Conduzindo o sensor a comportar-se unicamente como capacitivo, isto é,  $R_{\text{sensor}} = \infty$ .

Os sensores que utilizaram pedra pomes ou blocos de gesso como dielétricos foram construídos conforme esquema mostrado na “Fig. 3”.

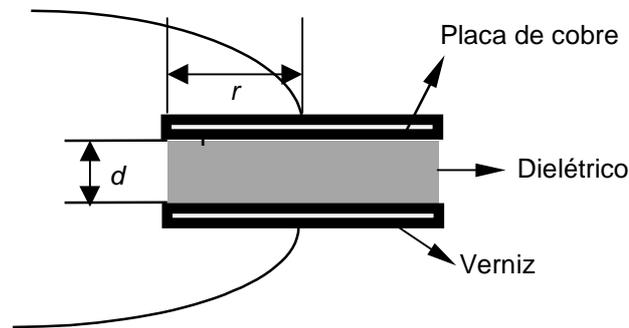


Figura 3 - Esquema construtivo dos sensores com dielétrico de blocos de gesso e pedra pomes, onde  $d$  é a distância entre as placas do capacitor e  $r$  o raio das mesmas.

Os sensores que utilizaram como meio dielétrico amostras do próprio solo foram construídos de modo diferente. As placas de cobre previamente cortadas e envernizadas eram unidas por meio de segmentos de tecnil (“Fig. 4a”). Neste último grupo de sensores utilizou-se uma variação quanto a posição dos segmentos de tecnil nas placas do capacitor. Nos sensores que apresentavam maiores dimensões foram utilizados quatro segmentos de tubos de tecnil montados nas placas de cobre, conforme mostrado na “Fig.4b”. Nos sensores que apresentaram menores dimensões, utilizou-se três segmentos de tubo de tecnil dispostos conforme apresentado na “Fig. 4c”. Ambos os sensores tiveram sua lateral fechada por uma tela sintética com malha de 2 mm.

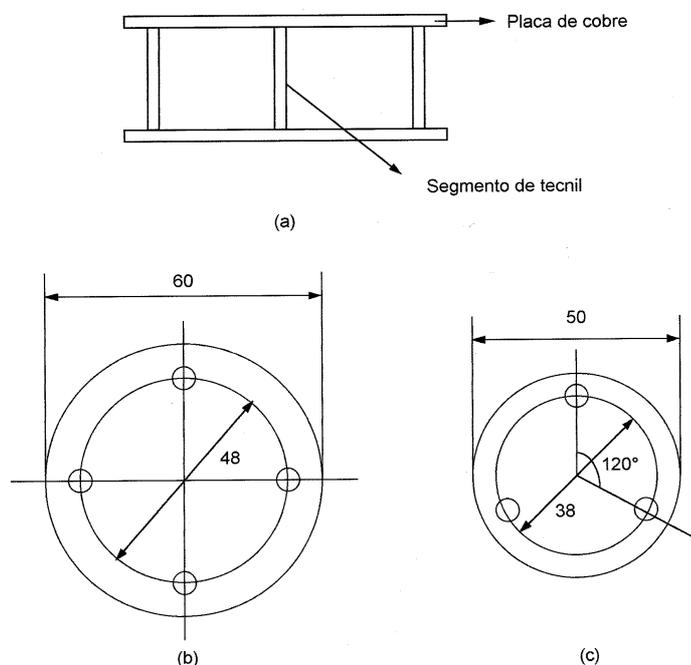


Figura 4 - Esquema construtivo dos sensores com dielétrico de amostra do próprio solo.

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. 3”).

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.

$$R_d = \frac{d}{r} \quad (3)$$

onde  $d$  é a distância entre as placas do capacitor e  $r$  o raio das mesmas (“Fig. 3”)

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

Adicionalmente, pode-se dizer que o objetivo de estudar sensores construídos de vários materiais e com níveis de porosidade diferentes possibilitará analisar o comportamento dos sensores no que tange a capacidade dos mesmos em entrar em equilíbrio com o potencial matricial do solo.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES DE UMIDADE

#### 3.1. Ensaios de avaliação dos sensores em laboratório

Para avaliar e caracterizar o comportamento dos sensores em diferentes condições de operação foram realizados ensaios em três solos que apresentavam texturas distintas. Na “Tabela 2” é apresentada a composição granulométrica do solo.

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

Na “Tabela 2”, o solo A é classificado como areia quartzosa, o B como Latossolo Vermelho Escuro de textura argilosa e o C como Latossolo Vermelho Escuro de textura muito argilosa.

Após a caracterização dos solos, quanto a textura, iniciou-se os ensaios de avaliação dos sensores.

O primeiro passo consistiu no preparo do solo para uso. Inicialmente, as amostras de solo foram secas em estufa 105°C - 110°C, por um período mínimo de 24 horas, até atingirem peso constante. Após a secagem e posterior resfriamento, as mesmas foram destorroadas mecanicamente, com o auxílio de um rolo de madeira e passadas em uma peneira de 2 mm. Este procedimento inicial foi adotado em todos os ensaios com os sensores capacitivos nos três tipos de solo considerados.

Nos ensaios foram utilizados recipientes de PVC que possuíam somente a extremidade superior aberta. Na extremidade inferior foram feitos 5 orifícios de 6 mm de diâmetro, com a finalidade de que o sistema pudesse ser umedecido com água por capilaridade, e que uma vez atingido a saturação, não houvesse acúmulo de água no fundo do recipiente. Basicamente, foram utilizados dois tipos de recipientes durante os ensaios. O primeiro apresentava diâmetro interno igual a 100 mm, diâmetro externo de 106 mm e altura de 50 mm. O segundo possuía as mesmas

dimensões, diferindo quanto a altura, que neste era de 70 mm. Essa variação foi necessária para que houvesse melhor acomodação dos sensores de maiores dimensões.

Os sensores devidamente energizados foram, então, instalados nos recipientes de PVC. O sistema foi preenchido com a terra previamente preparada como descrito acima. Tomou-se o cuidado de instalar adequadamente os sensores no meio da amostra. O conjunto foi umedecido por capilaridade durante 24 horas, até atingir a saturação, sendo, então, colocado sobre um suporte de tela com malha de 20 mm, para que ocorresse o processo de secagem. A secagem efetuou-se no próprio ambiente de laboratório, à sombra, protegida de correntes de ar para que o processo fosse lento. Foi utilizado somente um ciclo de secagem nos experimentos. 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 determinada através da “Eq. 4”.

$$U\% = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_3} \times 100 \quad (4)$$

onde U% é a porcentagem de umidade com base em peso seco,  $P_1$  é o peso da amostra úmida,  $P_2$  o peso da amostra seca e  $P_3$  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.

Com os dados obtidos, construiu-se uma tabela e obteve-se as curvas, para cada tipo de solo e sensor ensaiado, relacionando-se o teor de umidade com a tensão elétrica fornecida pelo sensor. As medidas experimentais obtidas são apresentadas a seguir.

### 3.2 – Sensor com dielétrico de pedra pomes

No primeiro ensaio utilizou-se um sensor construído com dielétrico de pedra pomes, com 25 mm de diâmetro, 5 mm de distância entre as placas do capacitor, o que conduz a um  $R_d$  igual a 0,4. Este sensor foi avaliado nos três tipos de solos. Com o objetivo de verificar a influência do fator geométrico no comportamento do sensor, foram realizados ensaios com um segundo sensor com dielétrico de pedra pomes. Este sensor possuiu 50 mm de diâmetro, 20 mm de distância entre as placas do capacitor o que conduziu a um  $R_d$  igual a 0,8. Este sensor foi avaliado nos mesmos tipos de solos que o sensor com  $R_d = 0,4$ . Os gráficos apresentados na Figura 5 relacionam a porcentagem de umidade com base em peso seco com a tensão elétrica fornecida pelos sensores de pedra pomes com  $R_d = 0,4$  e com  $R_d = 0,8$ .

Inicialmente, observa-se que as curvas possuem um aspecto semelhante para os três tipos de solos utilizados nos ensaios. Portanto, considerando-se em primeira instância, a curva obtida nos ensaios conduzidos em areia quartzosa, é possível constatar que há uma pequena variação na tensão fornecida pelo sensor entre o intervalo compreendido entre o *ponto de saturação*, PS, que para neste ensaio foi 32,31% e o ponto correspondente à *capacidade de campo*, CC, no caso 13,93%. No entanto, deve-se salientar que este valor da *capacidade de campo* é um pouco superior ao intervalo apresentado por Klar, (1991) que para este tipo de solo se situa entre 6,5% a 12% de umidade com base em peso seco. No intervalo entre PS e CC há a predominância do potencial de pressão sobre as demais componentes do potencial total da água no solo. Nesta análise é considerado que o potencial gravitacional mantém-se constante, em qualquer situação de funcionamento do sensor, visto que este foi mantido em uma mesma profundidade. Contudo, abaixo do intervalo definido entre o *ponto de saturação* do solo e o ponto correspondente à *capacidade de campo*, o potencial matricial adquire maior importância. Considerando-se que o material poroso utilizado como dielétrico, neste caso pedra pomes, é permeável a água e a sais minerais, a água presente no interior do dielétrico possui a mesma concentração da água presente no solo, portanto pode-se afirmar que a variação da tensão elétrica fornecida pelo sensor, ocorrida de maneira mais acentuada quando o teor de umidade encontra-se abaixo da *capacidade de campo*, não é devida ao

potencial osmótico. Assim, 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.

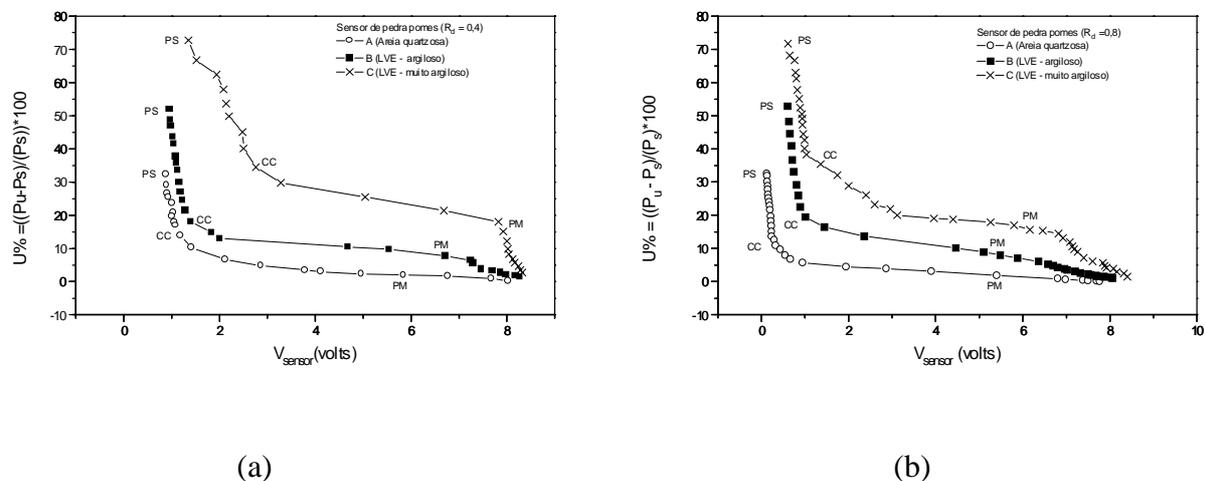


Figura 5 – Relação entre a capacitância e a porcentagem com base em peso seco presente no solo para o sensor construído com dielétrico de pedra pomes com  $R_d = 0,4$  (a) e com  $R_d = 0,8$  (b) (PS = Ponto de Saturação, CC = Capacidade de Campo, PM = Ponto de Murcha de Permanente)

As curvas apresentadas na “Fig. 5” para os ensaios apresentam o mesmo comportamento, ou seja há uma pequena variação da tensão fornecida pelo sensor quando ocorre uma significativa variação do teor de umidade, no intervalo compreendido entre o *ponto de saturação*, PS, e o ponto correspondente a *capacidade de campo*, CC, sendo este último ponto para solos argilosos compreendido em torno de 18% a 26% e para solos muito argiloso compreendido no intervalo de 31% e 39% de umidade com base em peso seco. Assim, a partir dos dados mostrados no gráfico constata-se que os prováveis pontos de *capacidade de campo* (CC), observado nos gráficos da “Fig. 5”, para os três tipos de solos analisados, apresentam como sendo  $CC = 13,83\%$ ,  $CC = 18\%$  e  $CC = 34,5\%$ , respectivamente, para areia quartzosa, solo argiloso e solo muito argiloso, os quais encontram-se dentro ou bem próximos dos intervalos citados por Klar (1991), mostrando que os sensores comportam-se adequadamente para medir o potencial matricial do solo.

Contudo, a importante conclusão que se chega através dos gráficos apresentados na “Fig. 5” é que as variações existentes entre as curvas que relacionam a tensão elétrica e a porcentagem de umidade com base em peso seco, deve-se ao fato que cada tipo de solo possui uma particular curva de retenção de umidade que é uma propriedade físico-hídrica do solo, ou seja é um parâmetro que é função das físicas do solo como por exemplo a textura. Assim, o que se conclui é que apesar dos sensores capacitivos sofrerem pouca influência do solo ou da sua composição química,  $0,2\%/^{\circ}\text{C}$  (Biage, 1998), não é possível obter uma curva universal de calibração, independente do tipo de solo.

Outro aspecto importante a ser considerado, o qual foi claramente observado neste estudo, constitui-se no fato que as características de retenção de água no solo depende quase que exclusivamente das propriedades do solo, sendo, assim, as medidas do teor de umidade no solo conduz a obter-se as informações necessárias, que aliadas as informações provenientes da planta e de fatores climáticos locais, tornam-se suficientes para o controle do processo de irrigação.

Em uma última análise das curvas apresentadas na “Fig. 5”, também foram considerados os pontos relativos ao *ponto de murcha permanente*, PM. A determinação destes pontos tem como objetivo possibilitar a avaliação do comportamento do sensor entre os pontos correspondentes à *capacidade de campo* e ao *ponto de murcha permanente*, que são os limites superior e inferior, respectivamente, do intervalo onde a água está prontamente disponível para o desenvolvimento das plantas.

Portanto, pode-se dizer que o sensor construído com dielétrico de pedra pomes pode ser perfeitamente utilizado para monitorar a umidade presente no solo, desde que, sejam construídas as curvas de calibração que relacionem a tensão elétrica fornecida pelo sensor com o teor de umidade presente no solo.

### 3.3 - Sensor com dielétrico de amostra de solo

Neste segundo grupo de ensaios, utilizou-se sensores construídos com dielétrico de amostras 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. Testou-se os sensores que possuíam 50 mm de diâmetro e 20 mm de distância entre as placas do capacitor, o que conduziu a um  $R_d$  igual a 0,8. Também, com a finalidade de verificar a influência do fator geométrico no comportamento dos sensores construídos com dielétricos de amostra de solo foram realizados ensaios com um segundo sensor, o qual foi construído com um diâmetro de 60 mm e uma distância entre as placas do capacitor de 30 mm, cujo  $R_d$  é igual a 1. De forma semelhante aos sensores anteriores, estes foram avaliados nos três tipos de solos, utilizando-se o mesmo solo para o dielétrico e a amostra testada.

Na “Fig. 6” são plotados os gráficos que relacionam a porcentagem de umidade com base em peso seco do solo, em função da tensão elétrica fornecida pelos sensores.

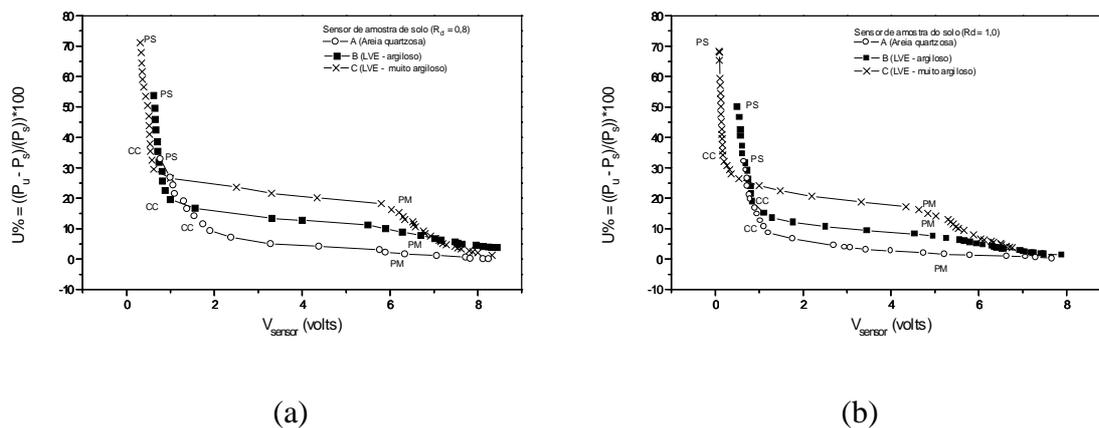


Figura 6 – Relação entre a capacitância e a porcentagem de umidade com base em peso seco presente no solo para o sensor construído com dielétrico de amostra de solo com  $R_d = 0,8$  e com  $R_d = 1,0$  (PS = Ponto de Saturação, CC = Capacidade de Campo, PM = Ponto de Murcha Permanente).

Nas curvas apresentadas na “Fig.6” as considerações a serem feitas com relação aos resultados apresentados são as mesmas descritas para os sensores de que utilizaram como dielétrico pedra pomes, ou seja é possível verificar que há uma grande influência do potencial matricial no comportamento do sensor.

Um outro fato a ser considerado é que nos ensaios com os sensores de pedra pomes e com os sensores de amostra de solo foi possível verificar que os sensores com maiores dimensões apresentaram maiores sensibilidades quando comparados com os sensores menores.

## 4. CONCLUSÕES

Neste estudo testou-se sensores com dielétricos de pedra pomes e de amostras de solo de diferentes dimensões. Observou-se que todos os sensores entram em equilíbrio com o potencial matricial do solo, e não com a água presente no solo. Este fato é de grande importância, pois as teorias que estabelecem critérios de irrigações e determinam a quantidade de água consumida pelas plantas baseiam-se na quantificação desta variável. Dentro deste contexto, pode-se dizer que esta

informação levantada constituiu um dos mais importante aspecto do estudo realizado, pois constatou-se um fato já descrito na literatura, contudo, com poucos estudos evidenciando de forma convincente este aspecto, principalmente, para sensores capacitivos.

Outro aspecto importante que os resultados permitiram inferir, é que, o comportamento dos sensores capacitivos é característico para cada tipo de solo, sendo portanto, necessário o desenvolvimento de curvas de calibração próprias.

## REFERÊNCIAS

- Andrade, C. L. T. de, "Parâmetros de solo-água para a engenharia de irrigação e ambiental", Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Poços de Caldas, MG, Brasil, pp. 1-46, agosto 1998.
- Bernardo. S., "Irrigação e produtividade", Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Poços de Caldas, MG, Brasil, pp. 117-132, agosto 1998.
- Bernardo, S. "Manual de Irrigação e Drenagem" - 6ª ed., Viçosa: UFV, Imp. Univ., 1995. 657 p.
- Biage, M. "Analysis of impedance probes behavior applied to liquid film thickness measurements", RBCM - Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences. 20 (4): 485-505, 1998.
- Camargo, A. P., Pereira, A. R., "Prescrição de rega por modelo climatológico". Campinas, Fundação Cargill, 1990. 27p.
- Cardoso, H. E. A., *et alli*, "As águas da agricultura", Agroanalysis, 18(3): 27-28, março 1998.
- Gomide, R. L., "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, agosto 1998.
- Klar, A. E., "Irrigação: Frequência e quantidade de aplicação". São Paulo, Nobel, 1991, 156 p.
- Marouelli, W. A., "Manejo da irrigação em hortaliças", 5ª ed. Brasília: EMBRAPA - SPI, 1996. 72 P.
- Pinto, C. .A. R. "Desenvolvimento de um sistema de monitoramento à distância de umidade de solo". Tese de Mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica de Uberlândia :UFU,1997. 102 p.
- Santos, J. R. M., "Irigar é preciso", Agroanalysis 18(3): 29-34, março 1998.
- Sediyama, C. G. *et al.* "Relações clima-água-planta", Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Poços de Caldas, MG, Brasil, pp. 47-116, agosto 1998.
- Siqueira, P. R., "Efeito da irrigação na produtividade do cacaueteiro (*Theobroma cacao*, L.), Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Vol. I, Jundiaí, SP, Brasil, pp. 116-127, 1987.
- Spinoza, W. G., e LINS, J.F., "A importância da água para a citricultura no estado de São Paulo", Anais do VII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem: 493 - 534, Set 1986.

## CARACTERIZATION OF CAPACITIVE SENSORS FOR MONITOR THE HUMIDITY IN SOILS.

**Abstract.** *The irrigation is a technique developed to supply the need hydric of the plants. The use of the water should be optimize so that the culture just has enough for its development, with the minimum of waste. The objective of this paper is characterizing the acting of capacitive sensors built with dielectric of pomes stone ( $R_d = 0,4$  e  $R_d = 0,8$ ), soil sample ( $R_d = 0,8$  e  $R_d = 1,0$ ), being the parameter  $R_d$  a geometric fator relates the distance between the capacitor plates with the radius of the same ones. The curves presented relate the humidity percentage based in dry weight presented in the soil as a function of the eletrict tension supplied by the sensor. The obtain results allowed to infer that the behavior of the capacitive sensor were characteristic for each type soil, being, therefore, necessary the development of appropriate curves of calibration relating the soil humidity in function of the electric tension supplied by the sensor.*

**Keywords:** *Automation, Agricultural instrumentation, Capacitive sensor.*