

AVALIAÇÃO DE SENSOR CAPACITIVO PARA O MONITORAMENTO DO TEOR DE ÁGUA DO SOLO

TADEU M. L. CRUZ¹, ADUNIAS DOS S. TEIXEIRA², FRANCISCO J. F. CANAFÍSTULA³, CLEMILSON C. DOS SANTOS⁴, ANTONIO D. S. DE OLIVEIRA⁵, SÉRGIO DAHER⁶

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo avaliar sensores capacitivos desenvolvidos para monitorar o teor de água do solo. Os sensores foram submetidos a testes para avaliar o efeito da temperatura, o tempo de resposta, obter a equação de calibração e determinar a sua sensibilidade. Foram analisados em diferentes situações (solo, água e ar) e temperaturas (25 °C; 20 °C; 15 °C; 10 °C; 5 °C e 0 °C). A calibração foi efetuada com um dos sensores capacitivos instalado em uma coluna de solo (indeformada) contida em um tubo de PVC (0,015066 m³) e suspensa em um dos lados de uma balança de braços. Na outra extremidade da balança, havia uma célula de carga conectada a um sistema de aquisição de dados. Os resultados indicaram redução na frequência do sensor capacitivo com o aumento da temperatura. O sensor capacitivo apresentou alta velocidade de resposta (menos de um segundo) ao imergi-lo na água e às variações da quantidade de água na amostra de solo e detectou as mudanças de perda de água pela coluna de solo no decorrer deste experimento, apresentando maior sensibilidade à medida que se diminui o conteúdo de água no solo. Portanto, o sensor capacitivo pode ser utilizado para determinar o teor de água do solo de forma adequada.

PALAVRAS-CHAVE: automação, irrigação, capacitância, constante dielétrica.

EVALUATION OF A CAPACITANCE SENSOR FOR MONITORING SOIL WATER CONTENT

ABSTRACT: This paper aims to evaluate a capacitance sensor for monitoring soil water content. Capacitance sensors were tested to evaluate the effect of temperature and response time, and to obtain the calibration equation and their sensitivity. Sensors were placed in different environments (soil, water and air) and temperatures (25 °C, 20 °C, 15 °C, 10 °C, 5 °C and 0 °C). The calibration was performed with one of the capacitance sensors installed in a PVC column containing 0.015066 m³ of undisturbed soil and hanged on one side of a scale with a load cell connected to a data acquisition board on the other side. Results showed reductions in the frequency response of the capacitance sensor with increasing temperature. The response time was low (less than one second) as it was immersed into water, as well as to an abrupt change in soil moisture in the soil column. It was verified that the sensitivity of the sensor increases as the soil moisture decreases. Therefore, the capacitance sensor can be used to determine the soil moisture.

KEYWORDS: automation, irrigation, capacitance, dielectric constant.

INTRODUÇÃO

Para realizar o manejo adequado de irrigação, é importante conhecer o teor de água existente no solo para, dessa forma, aplicar a quantidade de água necessária e no tempo correto. Nesse contexto, a utilização de sensores é um dos meios mais precisos para acompanhar o conteúdo de água no solo, e sua aplicação vem trazendo várias contribuições ao meio agrícola.

¹ Eng^o Agrônomo, Mestre em Irrigação e Drenagem pela UFC, Fortaleza - CE, tadeumacryne@hotmail.com. Bolsista do CNPq.

² Prof. Adjunto, Ph.D., Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza - CE, adunias@ufc.br

³ Prof. Assistente, Departamento de Engenharia da Computação, UFC, Sobral - CE, clemilsonccs@gmail.com

⁴ Doutorando em Engenharia Agrícola pela UFC, Fortaleza - CE, firmino@ufc.br

⁵ Eng^o Agrônomo, Doutorando em Irrigação e Drenagem pela UFC, Fortaleza - CE, dimasbat@hotmail.com

⁶ Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia Elétrica, UFC, Fortaleza - CE, sdaher@secrel.com.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 10-3-2008

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 23-10-2009

Os sensores do tipo capacitivos, por exemplo, têm seu princípio de funcionamento baseado na capacitância elétrica. Sua aplicação tem-se difundido bastante em pesquisas relacionadas à irrigação por ser um método não destrutivo. Esses sensores promovem alternativas para monitorar o teor de água no solo, como evidenciaram ZAZUETA & XIN (1994), que descreveram a grande capacidade que esses sensores têm de avaliar o conteúdo de água absoluta existente no solo em qualquer profundidade, com nível de precisão relativamente alto. Isso é possível porque, de acordo com GARDNER et al. (1998), a técnica da capacitância elétrica é um método capaz de medir a permissividade dielétrica no solo, podendo ser usada frequentemente para medições do seu conteúdo de água. Todavia, o efeito da temperatura em sensores, utilizados para quantificar o teor de água do solo, já foi reportado por COELHO & TEIXEIRA (2004), que explicaram a ocorrência de oscilações nas respostas dos sensores, quando expostos às flutuações de temperatura. Do mesmo modo, SILVA et al. (2005) relatam que a temperatura ambiente ocasiona variações nas respostas dos sensores capacitivos, explicando que a incidência da temperatura na constante dielétrica e nos componentes passivos (resistores e capacitores) é a possível causa dessas variações.

Em virtude de os sensores determinarem o conteúdo de água do solo de forma indireta, é imprescindível a realização de calibrações para os solos a serem monitorados, em razão das diferenças físicas que os mesmos apresentam. Essas calibrações podem ser realizadas em condições de laboratório e são bastante representativas, pois são utilizadas amostras indeformadas, que preservam as características do solo, como estrutura, densidade e aeração, como em sua forma original. Desse modo, SANTOS et al. (2006) asseguram que pode ser confiável a transferência dos modelos de calibração em laboratório para aplicações práticas em condições de campo. Além disso, GARDNER et al. (1998) ressaltam que, mesmo em condições de laboratório, cuidadosamente controladas, uma calibração individual do sensor capacitivo, para cada tipo de solo, é necessária quando se deseja obter medidas absolutas de conteúdo de água.

O que se leva sempre em questão ao analisar um sensor é o seu tempo ou velocidade de resposta. Por isso, o teste de imersão em água, recomendado por KIZITO et al. (2008), embora não perfeito, é um modo rápido e simples de avaliar o desempenho da sonda do sensor capacitivo. Aliás, OLIVEIRA (1999) resalta a importância de um sensor de umidade apresentar tempo de resposta à secagem do solo relativamente rápido para determinar, por exemplo, quando a nova irrigação deverá ser realizada. Apesar disso, a forma de coleta das respostas emitidas pelos sensores deve ser de maneira que permita a aquisição de amplas quantidades de dados. Devem-se levar em conta, então, as considerações de CARMO & BIAGE (2002) que, para adquirir valores médios em larga escala e melhores precisões, é fundamental a utilização de um sistema de aquisição de dados.

O sensor capacitivo monitora o teor de água do solo com base na variação do dielétrico. A sonda que o constitui gera uma onda quadrada com frequência que muda com a variação da constante dielétrica, o que permite a medida dessa última. Logo, o teor de água do solo será monitorado com base na variação do dielétrico. Como a constante dielétrica da água é 81 F m^{-1} , sendo muito maior que a das partículas do solo ($3 \text{ a } 5 \text{ F m}^{-1}$), torna-se possível o acompanhamento contínuo do teor de água no solo por meio do sensor capacitivo.

Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar um sensor capacitivo em relação ao seu tempo de resposta, efeito da temperatura e sensibilidade, além de obter a equação de calibração desse.

MATERIAL E MÉTODOS

Os sensores de umidade capacitivos (Figura 1) foram desenvolvidos no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), do Departamento de Engenharia Agrícola (DNA), pertencente à Universidade Federal do Ceará (UFC). Foram confeccionados na forma retangular, em placas de circuito impresso (fibra de vidro, com uma fina camada de cobre em um dos lados), com espessura, largura e tamanho aproximados de 0,002 m, 0,03 m e 0,15 m, respectivamente. As placas são posicionadas paralelamente, definindo os eletrodos do capacitor, separadas em 0,005 m e

cobertas por verniz que, segundo RENDE & BIAGE (2002), serve tanto para evitar oxidação das placas de cobre, devido o contato com o solo, como para eliminar o efeito da condutância elétrica da carga por meio do dielétrico. A área da placa que constitui o campo elétrico é de 0,002548 m². A parte eletrônica do sensor consiste em um oscilador, cuja frequência é definida pela capacitância do solo e por um resistor fixo de 10 k Ω .

Para todos os métodos experimentais realizados, o sistema de medição dos sensores foi constituído de uma fonte de alimentação externa, BK Precision, regulada com tensão de 6,60 V, e um contador de pulsos digital (frequencímetro) BK Precision, modelo 1856C de 2,4 GHz. A área da placa, que correspondente ao circuito do sensor, foi encapsulada com material constituído de resina (Figura 2) para proteção contra a água e resíduos. É importante que seja feita essa proteção para evitar danos e efeitos externos, como demonstra o trabalho de SÁNCHEZ et al. (2004).

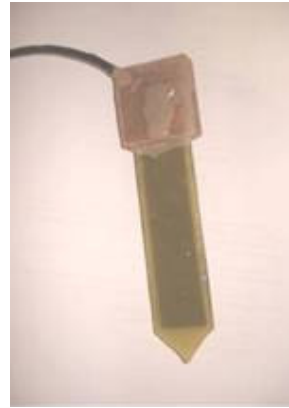


FIGURA 1. Sensor capacitivo. **Capacitance sensor.** FIGURA 2. Sensor capacitivo revestido com proteção de resina. **Capacitance sensor with resin protection.**

O solo utilizado nas análises é classificado como textura arenosa, com 70% de areia grossa, 22% de areia fina, 4% de silte e 4% de argila, apresentando densidade global de 1.670 kg m⁻³. Sua umidade, a 0,033 MPa e 1,5 MPa, é de 2,63 g 100 g⁻¹ e 1,94 g 100 g⁻¹, respectivamente. Três amostras foram retiradas na forma indeformada de uma área irrigada no Perímetro de Irrigação do Baixo Acaraú - CE, utilizando-se de tubos de PVC medindo 0,295 m de altura e 0,255 m de diâmetro. Preso a sua parte inferior, encontrava-se um trançado de linha de náilon para a sustentação do solo e uma manta de tecido, de malha fina, para facilitar o processo de escoamento de água, sem ocorrer perda de solo.

Para a análise do efeito da temperatura, os sensores foram colocados em três distintas situações: sensor acondicionado no solo; sensor imerso em água, e sensor suspenso no ar. A bancada experimental foi montada em uma câmara fria com temperatura controlada. O solo para a inserção do sensor encontrava-se acondicionado no tubo de PVC especificado anteriormente. O sensor foi inserido no centro de uma das amostras de solo em uma profundidade de aproximadamente 0,15 m. Antes do início do experimento, o solo foi saturado durante aproximadamente 24 horas. A água para a imersão do sensor estava contida em um Becker com capacidade de 2 L. As temperaturas nas quais os sensores foram submetidos corresponderam a 25 °C; 20 °C; 15 °C; 10 °C; 5 °C e 0 °C, com variações de aproximadamente 2 °C, para mais ou para menos, na câmara fria. Os dados de frequência dos três sensores foram coletados em intervalos de 10 minutos, durante 2 h, em cada temperatura. Esse procedimento foi realizado em quatro etapas, e o espaço decorrente entre elas foi de uma semana, período necessário para que ocorresse a secagem parcial do solo. Ao final de cada etapa, o conjunto (solo, PVC e sensor) foi pesado para o acompanhamento da variação de massa em decorrência da perda de água.

As análises estatísticas de regressão e comparação das médias foram feitas com o *software* SISVAR (FERREIRA, 2000), relacionando temperatura com as frequências dos sensores, etapas e situações, sendo testados os modelos cúbico, quadrático, potencial e linear. Foi escolhida a curva que apresentou o melhor coeficiente de determinação (R^2).

Para a avaliação do tempo de resposta e na definição da curva de calibração do teor de água em função da frequência, foi desenvolvida uma placa de aquisição de dados (Figura 3) para a coleta e a armazenagem da resposta (frequência) do sensor. A resposta do sensor capacitivo era visualizada tanto por intermédio do *Display* de Cristal Líquido (LCD) inserido na placa de aquisição, como pela CPU, que recebia os dados enviados por uma porta serial conectada à placa de aquisição, e visualizadas com o auxílio do programa de comunicação Hyperterminal do Windows. Com a placa de aquisição de dados, foi possível enviar ao computador vários dados de frequência.



FIGURA 3. Placa de aquisição de dados do sensor capacitivo. **Data acquisition board of the capacitance sensor.**

Os dados de frequência do sensor, para a avaliação do tempo de resposta, foram adquiridos de duas formas. Na primeira, o sensor encontrava-se suspenso no ar e, logo após 10 minutos de coleta de dados, o mesmo era imerso na água, permanecendo por mais 10 minutos. Esse processo foi repetido dez vezes. A primeira análise, que relacionava condições extremas, como a água e o ar, foi feita a fim de obter o tempo de resposta do sensor, quando esse era submetido a mudanças abruptas de material dielétrico. Levando-se em conta que a taxa de obtenção de dados pelo sistema de aquisição é de 2,4 dados por segundo, foi possível a obtenção de quantidade representativa de dados para a avaliação do tempo de resposta do sensor. Na segunda forma, 200 mL de água foram aplicados em outra amostra de solo, contido no PVC, no qual o sensor se encontrava introduzido. Essa última forma foi realizada com o intuito de verificar o tempo de resposta a um evento de irrigação ou chuva.

A curva de calibração do sensor foi obtida com o sensor instalado na terceira amostra de solo (indeformada) contida no tubo de PVC, tendo essa sido completamente saturada e posta em uma bandeja pendurada à extremidade inferior de uma célula de carga. Os dados de saída do sensor capacitivo e da célula de carga foram coletados por suas respectivas placas de aquisição de dados e visualizados pelo programa Hyperterminal. Os dados foram armazenados durante dez dias consecutivos.

A célula de carga utilizada é da ALFA Instrumentos, com capacidade nominal de 50 kg e que, segundo LEÃO et al. (2007), responde à variação de umidade do solo com erro de 0,25%, por causa das mudanças diurnas de temperatura. A placa de aquisição de dados, modelo TD40, da empresa TERN, juntamente com um amplificador instrumental, foi utilizada para coletar os dados de saída da célula de carga.



FIGURA 4. Estrutura utilizada para a calibração com os principais componentes: PVC contendo coluna de solo e sensor capacitivo inserido; balança e célula de carga. **Structure used for the calibration and main components: PVC column with soil and the capacitance sensor inserted; scale and load cell.**

Para a determinação da umidade em base de volume, primeiramente foi obtida a densidade aparente da amostra de solo, por meio da relação entre a massa do solo seco e o volume ocupado pela amostra, e posteriormente a umidade à base de massa. As eqs.(1), (2) e (3) definem o procedimento de obtenção da umidade em base de volume:

$$d_g = \frac{m_s}{V_s} \quad (1)$$

$$u = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \quad (2)$$

$$\theta = d_g u \quad (3)$$

em que,

d_g - densidade aparente do solo, kg m^{-3} ;

m_s - massa do solo seco, kg;

V_s - volume do solo, m^3 ;

u - umidade do solo à base de massa, kg kg^{-1} ;

m_u - massa do solo úmido, kg, e

θ - umidade do solo à base de volume, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

A sensibilidade dos sensores foi obtida ao final do processo de calibração, a partir da curva de calibração, possibilitando a determinação da variação perante as mudanças das quantidades de água, fornecidas pela célula de carga. Foi utilizado o software SAEG (UFV, 1999) para realizar as análises estatísticas de regressão. Foram testados os modelos cúbicos, quadrático, linear, potencial e exponencial para selecionar a curva com maior coeficiente de determinação e fisicamente consistente. Posteriormente, os dados de frequência foram aplicados na fórmula de calibração, e a sua curva foi dividida em três partes, com intervalo de 5% de umidade. Por fim, foi aplicada uma curva de tendência linear em cada parte, para identificar a sensibilidade do sensor com as variações do teor de água do solo com base no coeficiente angular das equações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises dos sensores, para as variações de temperatura nas três situações (acondicionado no solo; imerso em água e suspenso no ar), estão representados nas Figuras 5; 6 e 7,

respectivamente. As temperaturas observadas pelo termômetro e utilizadas para a análise variaram de $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

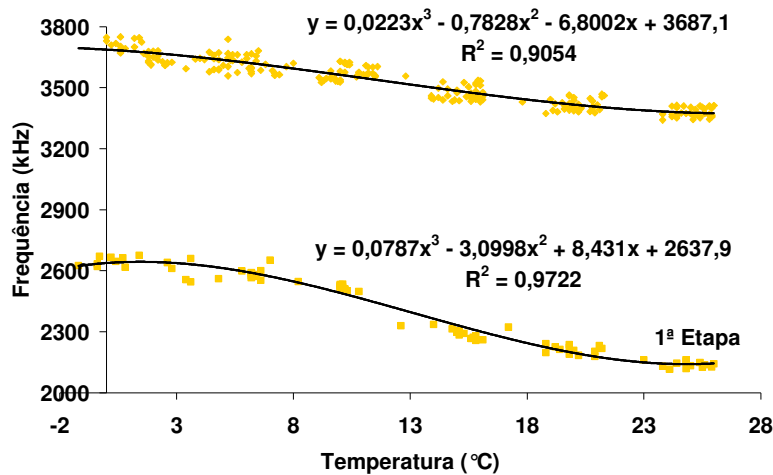


FIGURA 5. Dispersão dos dados das saídas do sensor capacitivo, acondicionado no solo, nas temperaturas de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. **Scaterring output of the capacitance sensor inserted into the soil for temperatures between $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.**

Ocorreu um problema durante a análise do sensor acondicionado no solo. Com isso, a primeira etapa, que constava o solo saturado, foi novamente realizada, e os sensores apresentaram leituras de frequências diferentes. Para melhor demonstrar a correlação desses dados, diante das variações de temperaturas, foram aplicados dois modelos de ajuste separadamente em ambos os dados. A polinomial do terceiro grau foi a que melhor se ajustou, com coeficiente de determinação de 0,9722, na primeira etapa que foi substituída, e 0,9054 para o restante das etapas.

O melhor modelo que se ajustou à variação de dados de frequência do sensor imerso na água (Figura 6) e do suspenso no ar (Figura 7) foi, também, o polinomial do terceiro grau, com as equações apresentando coeficiente de determinação de 0,9303 e 0,8335, respectivamente.

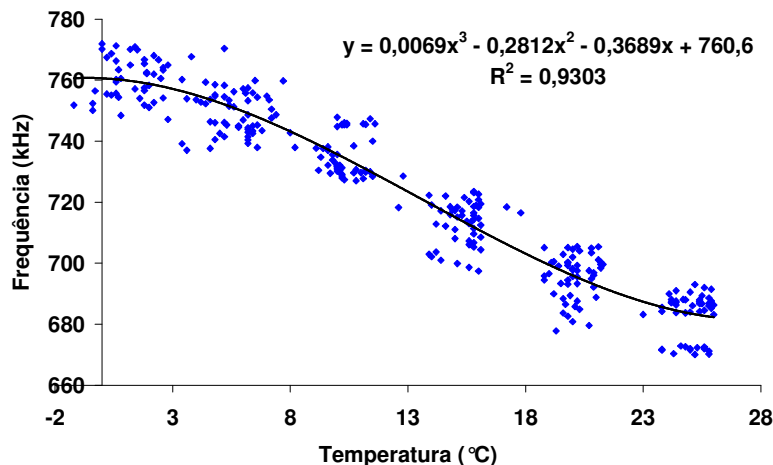


FIGURA 6. Dispersão dos dados das saídas do sensor capacitivo, imerso em água, nas temperaturas de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. **Scaterring output of the capacitance sensor immersed in water for temperatures between $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.**

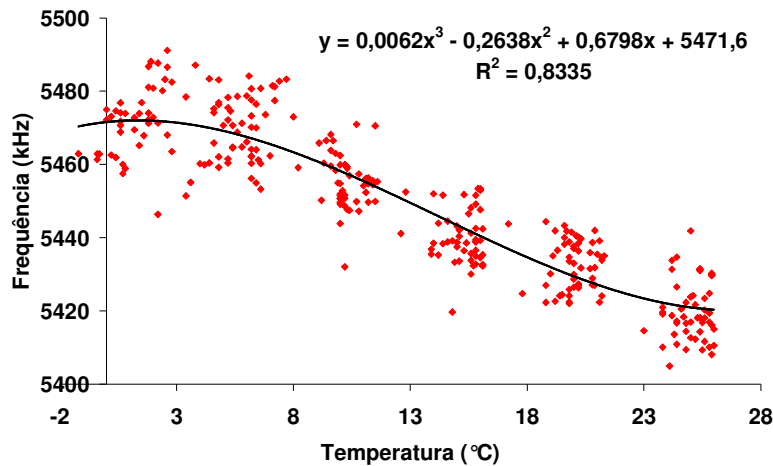


FIGURA 7. Dispersão dos dados das saídas do sensor capacitivo, suspenso no ar, nas temperaturas de 0 °C a 25 °C. **Scattering output of the capacitance sensor suspended in the air for temperatures between 0 °C and 25 °C.**

Os resultados dos sensores em cada situação indicam quedas na frequência com o aumento da temperatura. Na Tabela 1, apresentam-se as médias e os coeficientes de variação dos dados das frequências dos sensores capacitivos para as três situações (solo, água e ar), em que os sensores foram avaliados.

TABELA 1. Média e coeficiente de variação das frequências nos sensores capacitivos para as quatro etapas, nas diferentes situações. **Average and coefficient of variation of frequencies for capacitance sensors for the four steps in different environments.**

Etapa	Solo	Água	Ar
1 ^a	2.396,01 a	7.20,65 ab	5.440,86 a
2 ^a	3.489,37 b	7.26,68 b	5.454,45 b
3 ^a	3.513,41 bc	7.14,86 a	5.450,15 b
4 ^a	3.558,88 bc	7.28,41 b	5.447,15 ab
C.V.(%)	4,17	3,90	0,37

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

A diferença da média de frequência do sensor acondicionado no solo, na primeira etapa, em relação às outras, pode ser explicada pelo fato de a mesma ter sido submetida a essa análise logo após a sua saturação. Isso fez com que o solo perdesse água rapidamente pelos processos de infiltração e de percolação, causando rápida diminuição na rigidez do material dielétrico do meio, contribuindo para a diminuição da capacitância e, conseqüentemente, para a redução do tempo de oscilação do circuito. Com isso, nas etapas seguintes, um rápido aumento de frequência foi verificado. Esses comportamentos podem ser explicados pela relação proporcional que a capacitância tem com a constante dielétrica e da relação inversamente proporcional entre a frequência e a capacitância. A pequena variação das respostas do sensor capacitivo, suspenso no ar, foi devido à grande dispersão de dados apresentados por ele. A análise estatística comprova que a água no solo contribui significativamente para a alteração dos valores de capacitância, permitindo, assim, mensurar o conteúdo de água existente no mesmo.

Na Tabela 2, apresentam-se as médias e os coeficientes de variação das frequências dos sensores capacitivos nas três situações (solo, água e ar), para todas as temperaturas.

TABELA 2. Média e coeficiente de variação das frequências nos sensores capacitivos em todas as temperaturas, nas diferentes situações. **Average and coefficient of variation of frequencies for capacitance sensors for all tested temperature in different environments.**

Temperatura (°C)	Solo	Água	Ar
25	3.067,60 a	683,17 a	5.419,66 a
20	3.112,56 ab	695,62 b	5.432,73 b
15	3.176,42 abc	713,40 c	5.439,90 c
10	3.309,85 abc	735,35 d	5.455,26 d
5	3.356,10 bc	748,10 e	5.468,90 e
0	3.414,00 c	760,27 f	5.472,48 e
C.V. (%)	15,25	0,96	0,15

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Conforme a Tabela 2, a média das frequências do sensor capacitivo acondicionado no solo à temperatura de 25 °C diferiu significativamente em relação aos valores encontrados às temperaturas de 5 °C e 0 °C. Ou seja, as leituras do sensor capacitivo, acondicionado no solo, só apresentam diferenças significativas quando ocorre variação de 20 °C na temperatura do meio. Já para as outras situações, as médias das frequências dos sensores capacitivos diferiram para todas as temperaturas, com exceção dos valores obtidos nas temperaturas de 5 °C e 0 °C, na situação em que o sensor permanecia no ar, onde não apresentaram diferenças. As diferenças das frequências dos sensores capacitivos, tanto na água como no ar, corroboram o efeito da temperatura no dielétrico. Diferentemente do observado por KIZITO et al. (2008), em que a temperatura não ocasionou efeito nas leituras feitas quando o sensor capacitivo se encontrava no ar.

Na Tabela 3, apresenta-se uma análise estatística relacionando as frequências do sensor capacitivo, acondicionado no solo, com as temperaturas em cada etapa. Houve diferença estatística das médias de frequências entre as temperaturas. Na Tabela 3, comprova-se que as médias de frequências dos sensores capacitivos, em cada etapa, identificaram melhor o efeito da temperatura, indicando que a modificação em 5 °C no ambiente pode ocasionar alteração significativa na resposta (frequência) do sensor capacitivo.

TABELA 3. Média e coeficiente de variação das frequências do sensor capacitivo acondicionado no solo em todas as temperaturas e etapas. **Average and coefficient of variation of frequencies for capacitance sensors inserted into the soil for all temperatures and the four steps.**

Temperatura (°C)	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa	4ª Etapa
25	2.138,54 Aa	3.355,69 Ba	3.370,69 Ca	3.405,46 Da
20	2.211,38 Ab	3.392,77 Bb	3.401,08 Bb	3.445,00 Db
15	2.293,54 Ac	3.451,00 Bc	3.452,46 Bc	3.508,69 Dc
10	2.516,15 Ad	3.540,46 Bd	3.567,08 Cd	3.615,69 Dd
5	2.571,85 Ae	3.576,69 Be	3.618,69 Ce	3.657,15 De
0	2.644,62 Af	3.619,62 Bf	3.670,46 Cf	3.721,31 Df
C.V. (%)	0,82	0,33	0,38	0,46

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas representam as linhas, e minúsculas, as colunas.

Considerando o valor do peso do solo medido no final da primeira etapa (32,880 kg) e o que foi medido no final da última etapa (30,980 kg), foram perdidos 1,9 kg de água, com a maior quantidade ocorrida entre a primeira e a segunda etapa de 0,88 kg. É importante lembrar que, à medida que o solo vai perdendo água, as respostas em frequências fornecidas pelos sensores capacitivos tendem a se elevar. Entretanto, o aumento da temperatura contribuiu para a redução do

valor da resposta em frequência, nos três sensores avaliados. Tal lógica reforça os resultados obtidos por SILVA et al. (2005), ao observarem que o acréscimo de temperatura resultava na redução da frequência do sensor capacitivo. Todavia, as respostas dos sensores seguiram o modelo cúbico ajustado, apresentado na Figura 5. Resumindo, o sensor capacitivo apresenta sensibilidade às variações de temperatura para a faixa avaliada (0 °C a 25 °C).

Na Figura 8, identifica-se a resposta do sensor capacitivo quando o mesmo foi submetido a leituras no ar e na água para determinar o seu tempo de resposta. No eixo das abscissas, está representada a quantidade de dados gravados durante 200 minutos, e no eixo das ordenadas, estão reproduzidos os valores de frequências quando o sensor, durante o período de 10 minutos, esteve imerso na água e suspenso no ar. No total, foram registradas 28.744 leituras durante o teste.

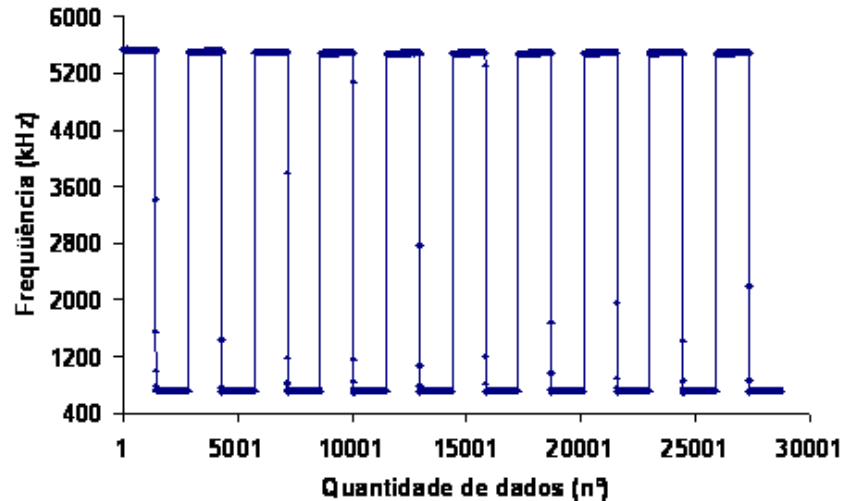


FIGURA 8. Resposta instantânea de frequência do sensor capacitivo ao ser imerso em água.
Instantaneous frequency response of the capacitance sensor as it was immersed into water.

O sensor capacitivo, quando suspenso no ar por 10 minutos, apresentou leituras máximas de frequência em torno de 5.531,00 kHz nas dez repetições. Porém, quando o mesmo foi imerso e permaneceu por dez minutos na água, forneceu leituras mínimas de frequência por volta de 706 kHz. As temperaturas da água e do ar durante o teste variaram de 27,8 °C a 28,7 °C e 27,9 °C a 30,4 °C, respectivamente.

Pela observação da Figura 8, pode-se concluir que a resposta do sensor capacitivo à imersão em água é instantânea (menos de um segundo). Quando o sensor capacitivo possui, entre as suas placas, um material com alto valor de constante dielétrica como a água, por exemplo, a quantidade de cargas armazenadas nas placas aumentará, fazendo com que o tempo de carga e a descarga do circuito sejam maiores. Isso faz com que a frequência diminua e mostre valores como os que são visualizados na Figura 8.

As variações das respostas de frequência produzidas pelo sensor capacitivo, ao aumentar o teor de água no solo úmido, podem ser visualizadas na Figura 9. O tempo de coleta de dados correspondeu a 24 horas, e o tempo desde o momento de aplicação de água até os últimos dados obtidos foi de 16 h e 37 min.

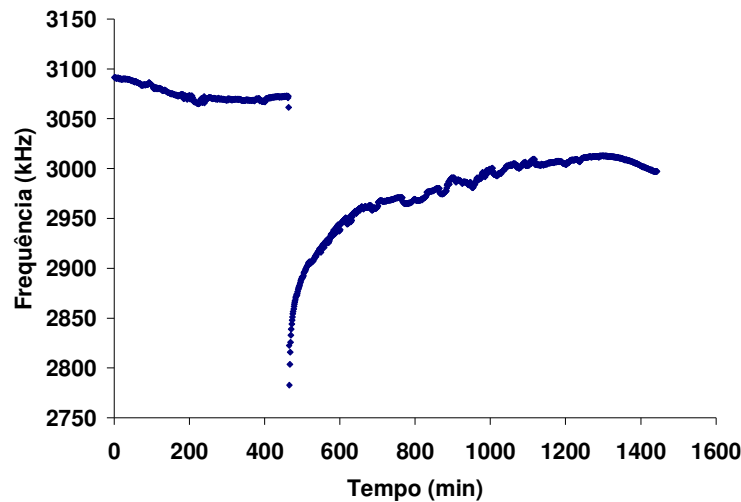


FIGURA 9. Dispersão dos dados de frequência fornecidos pelo sensor, com a mudança instantânea do teor de água no solo. **Scattering output of the capacitance sensor as soil water content changes instantaneously.**

Conforme pode ser observado na Figura 9, os valores de saída do sensor capacitivo decresceram quando o solo foi submetido a molhamento parcial. Os dados são condizentes com o teste apresentado anteriormente, evidenciando redução de frequência quando a água é detectada pelo sensor. Ainda no gráfico, podem-se observar pequenas oscilações da resposta de frequência durante esse processo, podendo ser explicados pelo efeito da variação diária de temperatura, conforme foi registrado neste trabalho e no trabalho apresentado por SILVA et al. (2005). Antes da aplicação de água, o sensor estava apresentando leituras estáveis, em torno de 3.072,63 kHz. Após essa aplicação, as leituras reduziram instantaneamente, como mostra a Figura 9, até aproximadamente 2.782,71 kHz, exibindo variação na frequência de 9,4% e, posteriormente, reduzindo por causa da secagem parcial do solo, até 2,4%, quando a coleta de dados foi encerrada.

Os resultados mostraram a alta velocidade de resposta do sensor capacitivo quando submetido em meios (ar e água) que possuem valores extremos de constante dielétrica e a variações do teor de água do solo, indicando o seu baixo tempo de resposta.

Os dados da célula de carga relacionados com as respostas do sensor capacitivo, durante o período experimental (9-6 a 19-6-2007 - dez dias), estão registrados na Figura 10, em que os valores da célula de carga estão em número digital (contadores de 0 a 4.095), e os dos sensores capacitivos estão em frequência (kHz).

Com base na Figura 10, verifica-se aumento nos valores de frequência e redução nos valores de contadores, à medida que a massa de água do solo diminui. É evidenciada, também, a ocorrência de oscilações dos dados da célula de carga e do sensor capacitivo durante esse período, o que se deve ao efeito da variação na temperatura ambiente. Esse fato é semelhante aos resultados obtidos por LEÃO et al. (2007) e SILVA et al. (2005). Contudo, foi constatado que o sensor reagiu às mudanças de perda de água, pela coluna de solo, no decorrer desse período, e mostrou-se capaz de determinar o teor de água do solo.

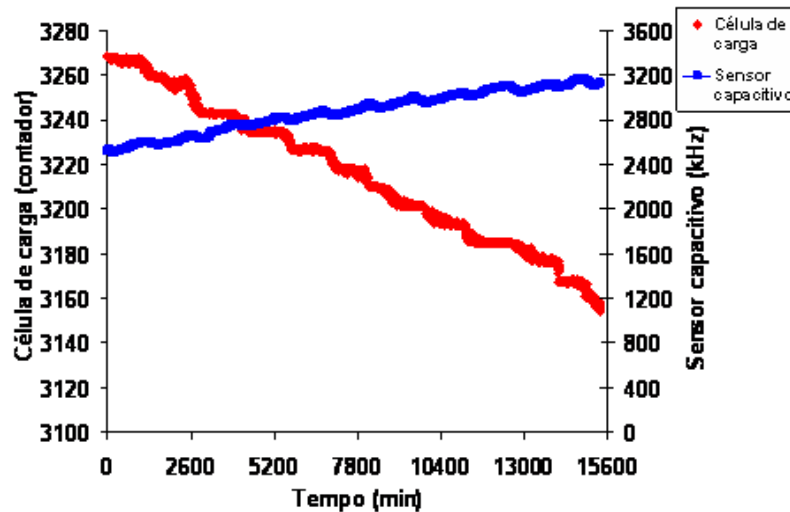


FIGURA 10. Dispersão dos dados de saída da célula de carga e das respostas do sensor capacitivo.
Scattering output of the capacitance sensor and load cell.

Considerando a variação dos dados da célula de carga e do sensor capacitivo, uma relação foi estabelecida, chegando-se à equação do teor de água em função da frequência (resposta do sensor capacitivo). Essa relação pode ser observada na Figura 11, mostrando a dispersão dos dados observados juntamente com a curva potencial estimada.

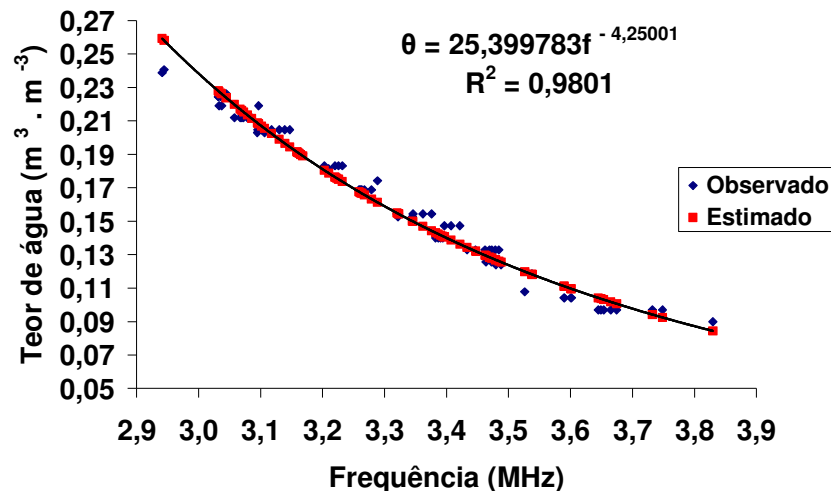


FIGURA 11. Dispersão dos dados do teor de água do solo *versus* respostas do sensor capacitivo.
Response of the capacitance sensor to change in soil water content.

O teste F realizado pelo SAEG validou a hipótese de que a regressão é significativa acima de 99,9%, sendo o melhor modelo o potencial, apresentando coeficiente de determinação de 0,9801. Apesar de o modelo polinomial ter apresentado melhor ajuste, o mesmo não foi utilizado para determinar a equação de calibração, devido essa ter mostrado valores discrepantes de teor de água. Isso se deve, provavelmente, à reduzida amplitude de variação entre os teores de água máximo e mínimo do solo estudado. Contudo, o coeficiente de determinação foi semelhante ao obtido por SILVA et al. (2007), que também apresentou curva potencial no mesmo perfil de profundidade (0,1 m a 0,3 m).

Na Figura 12, apresenta-se a dispersão dos dados de frequência quanto à variação do teor de água, ao longo do processo de calibração do sensor capacitivo, divididos em três trechos, e cada um com sua curva linear ajustada.

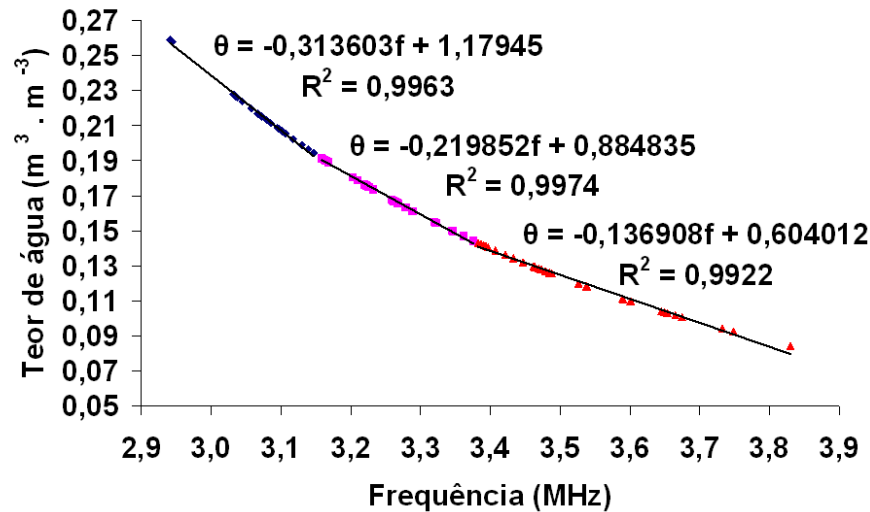


FIGURA 12. Dispersão dos dados do teor de água do solo em função da frequência, divididos em três trechos lineares. **Piece-wise linearization of the response of the capacitance sensor to changes in soil water.**

Com base nas equações da Figura 12, quanto mais seco o solo, maior é o coeficiente angular da equação. Tal situação permite dizer que a sensibilidade do sensor capacitivo é alta para baixos valores de conteúdo de água no solo. Resultados semelhantes foram observados por GARDNER et al. (1998).

CONCLUSÕES

O sensor capacitivo apresenta baixo tempo de resposta, que oscila com o efeito causado pela temperatura ambiente.

Tomando por base a sensibilidade do sensor capacitivo, o mesmo pode ser utilizado para a determinação do teor de água do solo de forma adequada.

O sensor capacitivo apresenta resposta à variação do teor de água do solo, com comportamento potencial, permitindo sua utilização no monitoramento e no controle da irrigação.

REFERÊNCIAS

- CARMO, L.C.; BIAGE, M. Calibração de sensores capacitivos para monitoramento de irrigação. *Revista Eletrônica Horizonte Científico*, Uberlândia, v.1, n.1, p.1-23, 2002. Disponível em: <www.propp.ufu.br/revistaeletronica/edicao2002/C/CALIBRACAO.PDF>. Acesso em: 16 maio 2007.
- COELHO, S.L.; TEIXEIRA, A.S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.24, n.3, p.536-545, 2004.
- FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. *Anais...* São Carlos: UFSCar, 2000. p.255-258.
- GARDNER, C.M.K.; DEAN, T.J.; COOPER, J.D. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Silsoe, v.71, n.4, p.395-403, 1998.

KIZITO, F.; CAMPBELL, C.S.; CAMPBELL, G.S.; COBOS, D.R.; TEARE, B.L.; CARTER, B.; HOPMANS, J.W. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, Maryland Heights, v.352, n.3-4, p.367-378, 2008.

LEÃO, R.A.O.; TEIXEIRA, A.S.; CANAFÍSTULA, F.J.F.; MESQUITA, P.E.G.; COELHO, S.L. Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para calibração de sensores de umidade do solo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.1, p.294-303, 2007.

OLIVEIRA, C.A.S. Determinação da tensão de água em solo agrícola usando um sensor de dissipação de calor. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, n.8, p.1.417-1.425, 1999.

RENDE, A.; BIAGE, M. Characterization of capacitive sensors for measurements of the moisture in irrigated soils. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science*. Rio de Janeiro, v.24, n.3, p.226-223, 2002.

SÁNCHEZ, P.A.; UPADHYAYA, S.K.; VEJA, A.; JENKINS, B.M. Evaluation of a capacitance-based soil moisture sensor for real-time applications. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.47, n.4, p.1.281-1.287, 2004.

SANTOS, R.M.; OLIVEIRA, A.S.; BRANDÃO, F.J.C.; PEREIRA, F.A.C. Calibração em laboratório de sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry) para medição da umidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. *Anais...* Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2006. 1 CD-ROM.

SILVA, C.R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, A.B.; MELO, F.B.; COELHO FILHO, M.A. Calibration of a capacitance probe in a paleudult. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.64, n.6, p.636-640, 2007.

SILVA, I.O.; TEIXEIRA, A.S.; CANAFÍSTULA, F.J.F.; LEÃO, R.A.O. Development of a capacitance sensor for monitoring soil moisture. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2005, Tampa, Florida. St. Joseph: ASAE, 2005. (Paper nº 052183)

UFV. UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. *Manual de utilização do programa SAEG - Sistema para Análise Estatísticas e Genéticas*. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 59 p.

ZAZUETA, F.S.; XIN, J. Soil moisture sensors. University of Florida, 1994. 12 p. Disponível em: <<http://www.p2pays.org/ref/08/07697.pdf>>. Acesso em: 8 mar. 2007. (Bulletin, 292)