

Medição de umidade no solo através de sensores capacitivos

Andréa Carla Alves Borim*

Doutora em Engenharia Elétrica - UFU

Assessora de Desenvolvimento Educacional da Anhanguera Educacional

Professora da Faculdade Comunitária de Santa Bárbara

e-mail: andrea.borim@unianhanguera.edu.br

Carlos Alberto Ramos Pinto

Mestre em Engenharia Mecânica - UFU

Supervisor dos Laboratórios de Engenharia e Informática da Educacional da Anhanguera Educacional S.A.

Professor da Faculdade Politécnica de Jundiá

e-mail: carlos.ramos@unianhanguera.edu.br

■ Resumo

A aplicação de sensores capacitivos na medição de umidade do solo é analisada e discutida. Sensores capacitivos com placas metálicas envernizadas e dielétricos porosos de vários materiais foram construídos. Ensaio experimentais, com condições de umidade controlada foram realizados para calibrar os sensores e também para aferir a precisão das medidas.

Palavras-chave: humidade do solo, sensores capacitivos, irrigação

■ Abstract

The application of capacitive sensors for humidity measurement was discussed. Capacitive sensors with metal plates and porous dielectrics were build. Experimental research with known humidity conditions was developed to calibrate the sensors and to measure precision.

Key-words: Soil Humidity, Capacitive Sensors, Irrigation

■ Introdução

É comum alunos ingressantes nos cursos de engenharia, ao se depararem com as disciplinas do ciclo básico, principalmente cálculo, física e química, fazem a clássica pergunta: *Por que tenho que estudar isso? Onde vou aplicar este conteúdo?*

Neste momento é de fundamental importância que os professores destas disciplinas, mesmo não sendo engenheiros, saibam indicar a aplicabilidade dos conteúdos através de exemplo que façam parte do cotidiano do aluno e tenham relação com a profissão.

O objetivo deste artigo é estabelecer relação entre um dos conteúdos explorados na disciplina física, a capacitância, e sua aplicação direta na agricultura, através da construção de sensores que auxiliam a otimização dos recursos hídricos e energéticos, bem como o aumento da produção (PINTO, 1996).

Atualmente vários centros de pesquisa têm se dedicado a estudos nas áreas de Agricultura e Zootecnia de Precisão. Estas são linhas de pesquisa que se dedicam ao estudo e desenvolvimento de técnicas que melhorem a produtividade e desempenho vegetal e animal, bem como a otimização de recursos, visando a

*Bolsistas FUNADESP - Fundação Nacional de Desenvolvimento do Ensino Superior Particular

competitividade. Neste contexto, na área de instrumentação aplicada à agricultura, diversos trabalhos já foram realizados, visando compreender a atividade das plantas e otimizar a sua produtividade através do monitoramento e controle de condições ambientais (BORIM, 2003).

■ Irrigação

A irrigação aplicada na agricultura é uma atividade que melhora os níveis de produção das culturas através do fornecimento artificial de água. Proporciona assim um rendimento estável da plantação e um melhor aproveitamento da área agricultável, uma vez que torna a produção independente da ocorrência natural de chuvas (CARDOSO, 1994). A título de exemplo, culturas como o tomate e a alface têm seu desempenho comprovadamente relacionado com a quantidade de água disponível ao longo de todo desenvolvimento da cultura. Estudos mostram que, particularmente, para estas duas espécies possam se desenvolver de forma ideal é necessário que se mantenha o solo com no mínimo 80% de umidade útil. Assim, em áreas onde existe a ocorrência da estação das chuvas, a irrigação permite que o solo seja cultivado também no período da seca. Nas regiões de clima árido ou semi-árido, é possível cultivar produtos agrícolas aplicando técnicas apropriadas de irrigação, permitindo assim que áreas improdutivas ou de baixa produtividade, passem então a produzir, desde que existam rios ou lençóis de água subterrâneos, nas proximidades da lavoura, para abastecer o sistema (PINTO, 1996).

Sua aplicação, no entanto, responde pelo maior consumo de água e de energia em qualquer sistema agrícola. Assim, como a área irrigada tem aumentado consideravelmente, surge naturalmente, a preocupação de se preservar os recursos hídricos e energéticos disponíveis. Diversos outros motivos podem ser enumerados para justificar a aplicação de técnicas científicas aos processos de irrigação. Porém, o objetivo central sempre está em otimizar o consumo de água e energia, para maximizar a rentabilidade da produção e minimizar o impacto da atividade sobre o meio ambiente.

Otimização da Irrigação

Basicamente, os trabalhos científicos desenvolvidos com o objetivo de melhorar as técnicas

de irrigação dividem-se em quatro grupos principais que podem ser classificados de acordo com os recursos utilizados para caracterizar a situação da cultura estudada e de acordo com o processo de otimização da irrigação, são eles (PINTO, 1996):

- 1) Os que baseiam-se nas características meteorológicas e climáticas.
- 2) Os que utilizam informações geradas através de grandezas obtidas diretamente nas plantas.
- 3) Processos baseados em informações obtidas por medidas realizadas a partir do solo utilizado para a cultura.
- 4) Otimização de motores e bombas.

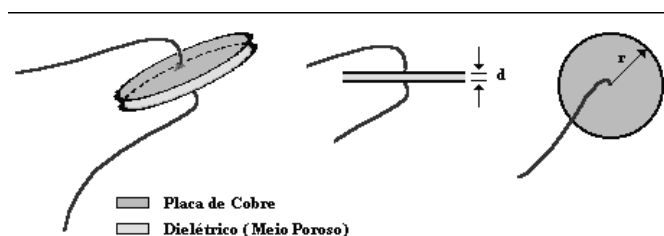
Neste trabalho está classificado no terceiro grupo, uma vez que propõe a construção de um sistema de irrigação baseado em informações colhidas do solo a partir de um sensor capacitivo.

■ Sensor Capacitivo

Neste trabalho propõe-se a utilização de sensores para medir o potencial de água no solo. Para isso foram construídos alguns sensores, através do uso de placas de cobre e alguns tipos de dielétrico, como por exemplo gesso e papel.

Todos os sensores construídos para verificar a eficiência do sistema proposto, apresentam basicamente a mesma constituição. Assim, a Figura 1 apresenta o diagrama do sensor com dielétrico de papel, desmontado para melhor visualização. Os demais sensores possuem apenas o dielétrico composto por materiais diferentes (HALLIDAY, 2002).

Figura 1: Esquema construtivo do sensor.



Princípios de Funcionamento do Sensor Capacitivo

O fenômeno da capacitância elétrica é utilizado numa grande variedade de sensores devido a algumas

características convenientes que ele apresenta. Basicamente, dois princípios podem ser utilizados para caracterizar uma determinada grandeza variante no tempo (EDMINISTER, 1985):

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

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

A definição mais abrangente de capacitância entre dois condutores quaisquer, imersos em um meio dielétrico homogêneo, é dada pela seguinte expressão (HAYT, 1983):

$$C = \frac{Q}{V_0} \quad (1)$$

onde Q é o módulo da carga elétrica total de cada condutor e V_0 é a diferença de potencial elétrico entre os condutores. Porém, com podemos ver, a formula apresentada nada diz a respeito do meio dielétrico ou da distância entre os condutores.

Para que possamos resolver esta questão devemos usar como recurso a Lei de Gauss. Partindo da aplicação da Lei de Gauss ao elemento diferencial de volume do condutor, pode-se escrever:

$$Q = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

onde \vec{D} é o vetor que representa a densidade de fluxo elétrico e o vetor $d\vec{S}$ representa o elemento diferencial de superfície do condutor.

Para deduzir a expressão do capacitor de placas planas e paralelas, utilizado neste trabalho, é necessário escrever a densidade de fluxo elétrico em função da intensidade de campo elétrico e da permissividade elétrica do meio. Assim, no vácuo, a densidade de fluxo elétrico pode ser escrita da seguinte forma:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (3)$$

onde ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo e \vec{E} representa o vetor campo elétrico.

Considerando qualquer outro meio dielétrico diferente do vácuo define-se a permissividade elétrica

da seguinte forma:

$$\epsilon = \epsilon_R \epsilon_0 \quad (4)$$

onde ϵ_R é uma grandeza que depende unicamente da natureza do meio dielétrico utilizado no capacitor.

Por outro lado, vindo da definição de diferença de potencial elétrico tem-se a seguinte expressão:

$$V_{AB} = - \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad (5)$$

Aplicando os resultados observados nas Equações (3), (4) e (5) na Equação (1), obtém-se a expressão a seguir:

$$C = \frac{\oint_S \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{S}}{- \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{L}} \quad (6)$$

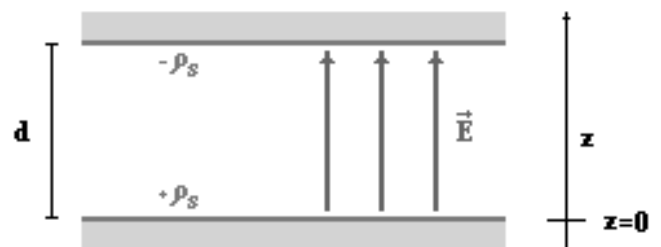
Analisando a Equação (6) conclui-se que a capacitância é independente da diferença de potencial aplicada e da carga elétrica presente em qualquer um dos condutores. Estas duas características resumem a utilidade do capacitor em circuitos elétricos.

Considerando-se agora um sistema particular mais simples, onde os condutores são planos infinitos e paralelos, conforme apresentado na Figura 2, é possível concluir que:

$$\vec{E} = \frac{\rho_s}{\epsilon} \vec{a}_z \quad (7)$$

onde ρ_s é a densidade superficial de cargas e \vec{a}_z é o versor do eixo coordenado z.

Figura 2: Capacitância para placas planas infinitas e paralelas.



Partindo da Equação (7) e utilizando a Equação (3), obtém-se:

$$\vec{D} = \rho_s \vec{a}_z \quad (8)$$

Considerando a diferença de potencial entre as placas obtém-se a equação a seguir:

$$V_0 = \int_{\text{sup.}}^{\text{inf.}} \vec{E} \cdot d\vec{L} = - \int_d^0 \frac{\rho_s}{\epsilon} dz \quad (9)$$

Realizando a integração descrita na Equação (9), obtém-se:

$$V_0 = \frac{\rho_s}{\epsilon} d \quad (10)$$

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

$$Q = \rho_s S \quad (11)$$

onde S é a área da placa utilizada no capacitor.

Substituindo as Equações (10) e (11) na Equação (1), obtém-se a seguinte equação:

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (12)$$

A Equação (12) é válida com bastante precisão para capacitores reais, desde que as dimensões da placa sejam consideravelmente maiores que a distância entre elas (KERCHNER, 1973). Neste caso, a suposição de que as placas são infinitas comparadas com a distância entre elas, é válida.

Observando mais detalhadamente a Equação (12), observa-se que o valor da capacitância depende exclusivamente de características do meio dielétrico e da geometria do capacitor. Desta forma, é bastante viável utilizar a capacitância elétrica como princípio de funcionamento para sensores. Neste caso, tanto a variação do parâmetro ϵ como a variação da distância d , podem ser utilizados para acompanhar a variação de outras grandezas.

Características do Sensor de Umidade em Solos

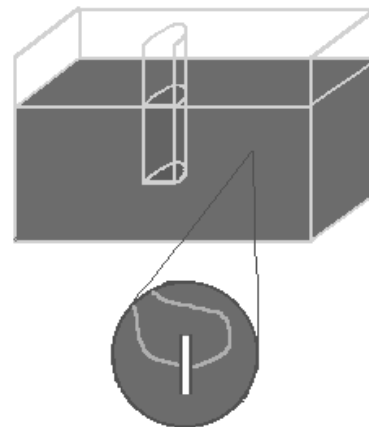
O sensor utilizado para monitorar a umidade no solo trabalha com base na variação da capacitância

elétrica do sensor de acordo com a variação da quantidade de água presente no substrato analisado. Como foi descrito na Seção 3.1, existem dois parâmetros básicos para utilizar a capacitância elétrica em sensores. No primeiro procedimento, a distância entre as placas do capacitor deve ser variada. Porém para este trabalho, a utilização da distância variável é inadequada. O mais conveniente no entanto, é utilizar a variação do meio dielétrico presente entre as placas do capacitor.

Assim, utilizando-se um capacitor não lacrado, dotado de um meio dielétrico poroso, a variação da capacitância depende exclusivamente do tipo e da quantidade de matéria presente entre as placas, uma vez que os demais parâmetros que influenciam no valor da capacitância podem ser considerados constantes para este caso. Desta forma, a medida que o solo ao redor do sensor se torna mais úmido, o meio poroso que compõe o dielétrico, absorve uma determinada quantidade de água, proporcional à umidade presente no substrato. Analogamente, quando o solo se torna mais seco, o meio dielétrico perde água em função da umidade presente ao redor do sensor. Este comportamento se deve ao fenômeno de difusão da água através de meios porosos. A Figura 3 apresenta esquematicamente, a forma como o sensor é aplicado no solo.

Sabe-se que a umidade na maioria dos tipos de solo pode ser variável de acordo com a profundidade considerada. Assim, a posição em que o sensor é colocado depende da cultura que está sendo analisada, uma vez que cada planta desenvolve a maior parte das suas raízes em profundidade específica. O sensor deve ser colocado na zona da raiz da planta analisada para que ele apresente uma resposta significativa da quantidade de água disponível para a mesma.

Figura 3: Representação do sensor no solo.



Partindo da Equação (12) pode-se concluir que o valor da capacitância do sensor varia linearmente com a permissividade elétrica do meio, uma vez que tanto a distância entre as placas como a área das mesmas são constantes. Desta forma, a resposta elétrica do sensor depende exclusivamente das variações ocorridas no meio dielétrico.

Cinco sensores foram construídos para a realização dos ensaios experimentais. Todos eles apresentam dimensões diferentes entre si de forma a permitir que os resultados fossem comparados e avaliados de acordo com o meio dielétrico e a dimensão dos mesmos. As características geométricas e os meios dielétricos utilizados nos sensores, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Características construtivas dos sensores de umidade no solo.

Sensor	Dielétrico	Raio (r) - [m]	Distância (d) - [m]	Área (S) - [m ²]	Rd = d / r
1	Papel	18.5 x10 ⁻³	1.0 x10 ⁻³	1.075 x10 ⁻³	5.405E-2
2	Pedra Pome	21.5 x10 ⁻³	16.5 x10 ⁻³	1.45 x10 ⁻³	7.674E-1
3	Pedra Pome	24.0 x10 ⁻³	9.0 x10 ⁻³	1.81 x10 ⁻³	3.750E-1
4	Gesso	19.0 x10 ⁻³	29.0 x10 ⁻³	1.13 x10 ⁻³	1.526
5	Gesso	18.5 x10 ⁻³	4.0 x10 ⁻³	1.075 x10 ⁻³	2.162E-1

Nesta tabela, o papel mencionado como meio dielétrico do primeiro sensor, é do tipo filtrante e apresenta microporosidade. Ainda, o parâmetro *Rd* é definido com o objetivo de caracterizar a razão existente entre a dimensão da distância entre as placas do sensor, com o raio das mesmas.

A variação encontrada entre os diferentes tamanhos dos sensores utilizados, tem como objetivo, permitir uma avaliação da influência de *Rd* sobre o comportamento dos sensores, tal que a hipótese de uniformidade do campo elétrico, considerada na Equação (7), seja satisfeita.

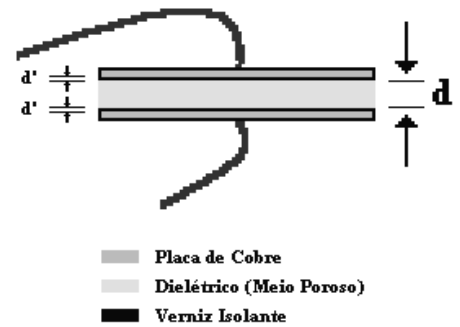
Porém, a Equação (12) não pode ser aplicada para calcular o valor da capacitância teórica dos sensores, tal como expressa anteriormente, mesmo supondo que as permissividades elétricas dos meios sejam bem conhecidas. Um elemento complicador surge devido às placas dos sensores serem completamente recobertas por um verniz isolante, para evitar a oxidação do cobre enquanto as mesmas estiverem imersas no solo. Porém, a principal propriedade deste isolamento é a de eliminar o possível efeito de condução de cargas elétricas

através do meio dielétrico que pode ocorrer dependendo da condutividade da água ou do solo.

A Figura 5 apresenta a vista lateral do sensor de forma mais detalhada. O verniz é um meio dielétrico presente entre as placas do sensor. Sabe-se que quando existem vários meios dielétricos distintos colocados entre as placas, o capacitor resultante desta combinação possui comportamento análogo a vários capacitores associados em série, onde cada um possui exclusivamente um dos dielétricos que compõe a associação.

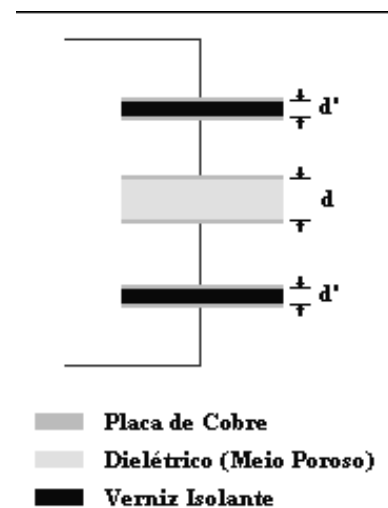
Esta suposição é verdadeira se os meios dielétricos são associados paralelamente às placas. Com base na Figura 4, observa-se que existem três capacitores associados em série no sensor.

Figura 4: Vista lateral ampliada do sensor.



Desta forma, para realizar um estudo teórico pode-se considerar que o sensor utilizado funciona da mesma forma que o esquema apresentado na Figura 5.

Figura 5: Representação elétrica equivalente do sensor.



Deseja-se, então, encontrar uma expressão para calcular a capacitância equivalente do circuito de capacitores em série que representa o sensor. Assim, partindo da Equação (1) e considerando que a tensão elétrica do circuito equivalente é igual à soma das tensões elétricas individuais de cada capacitor, pode-se escrever (DESOER, 1979):

$$C = \frac{Q}{V_{d'} + V_d + V_{d'}} \quad (13)$$

onde V_d representa a tensão elétrica aplicada sobre o meio poroso do sensor e $V_{d'}$ é a tensão aplicada sobre o verniz que recobre as placas.

A Equação (13) somente é válida quando os capacitores estão associados em série. Como por hipótese, as camadas de verniz aplicadas nas duas placas são iguais, escreve-se a Equação (13) na seguinte forma:

$$C = \frac{Q}{2V_{d'} + V_d} \quad (14)$$

Substituindo as Equações (10) e (11) na Equação (14), obtém-se o seguinte resultado:

$$C = \frac{\rho_s S}{2 \frac{\rho_s}{\epsilon'} d' + \frac{\rho_s}{\epsilon} d} \quad (15)$$

Onde as densidades superficiais de cargas são iguais para os três capacitores, uma vez que a área do sensor é constante. Assim, analisando a Equação (15), verifica-se que este termo pode ser cancelado:

$$C = \frac{S}{2 \frac{1}{\epsilon'} d' + \frac{1}{\epsilon} d} \quad (16)$$

Por conveniência, divide-se os dois termos da razão pela área S . O resultado obtido é apresentado na Equação (17):

$$C = \frac{1}{2 \frac{d'}{\epsilon' S} + \frac{d}{\epsilon S}} \quad (18)$$

Assim, aplicando a Equação (12) na Equação (18), finalmente obtém-se:

$$C = \frac{1}{\frac{2}{C_{d'}} + \frac{1}{C_d}} \quad (19)$$

Onde $C_{d'}$ é capacitância associada à cada camada de verniz e C_d é a capacitância do meio poroso. Como a capacitância das duas camadas de verniz é constante, a variação da capacitância do sensor depende apenas da variação da capacitância do meio dielétrico poroso. Com a conclusão obtida na Equação (19) é possível estimar o valor teórico da capacitância para o sensor, considerando o meio poroso completamente livre de umidade. Esta estimativa somente é possível para o sensor com dielétrico de papel filtrante, uma vez que os demais meios utilizados não possuem a sua permissividade elétrica catalogada na literatura disponível.

Assim, para que este cálculo seja realizado, é necessário considerar as dimensões do sensor indicadas na Figura 5. O raio não é afetado pelo verniz. Assim as distâncias consideradas são $d = 1.0 \times 10^{-3}$ m e $d' = 0.1 \times 10^{-3}$ m.

Ainda considerando a Equação (18), percebe-se que é necessário estimar a permissividade elétrica relativa do meio poroso e do verniz para calcular a capacitância associada a cada um dos meios. Os valores apresentados por Hayt (1983) para o verniz e para o papel são,

respectivamente, $\epsilon_{R_{Verniz}} = 1.2$ e $\epsilon_{R_{Papel}} = 4.2$. Para o vácuo, a permissividade elétrica é dada por $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m. Assim, utilizando-se a Equação (4) obtém-se $\epsilon_{Verniz} = 1.0625 \times 10^{-11}$ F/m e

$$\epsilon_{Papel} = 3.721 \times 10^{-11} \text{ F/m.}$$

Todas as grandezas necessárias para aplicar a Equação (12) já estão disponíveis. É possível, então, calcular os valores estimados para as capacitâncias parciais $C_{d'}$ e C_d . Assim aplicando-se os valores especificados acima na Equação (12), obtém-se $C_{d'} = 1.142 \times 10^{-10}$ F e $C_d = 1.335 \times 10^{-11}$ F. Com estes valores estimados é possível obter o valor da capacitância total do sensor. Aplicando-se estes valores na Equação (19), estima-se a capacitância teórica para o sensor, $C_s = 4.0 \times 10^{-11}$ F ou $C_s = 40.0$ pF.

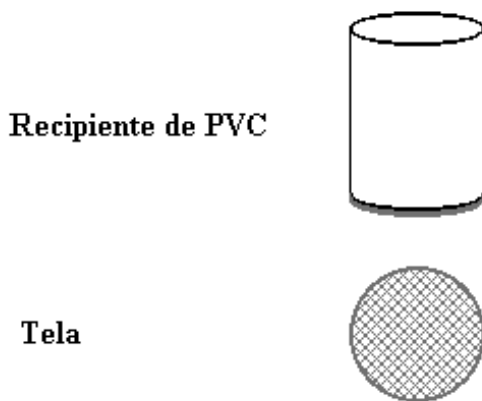
Dispositivo e procedimento de calibração

Para realizar os experimentos necessários à calibração do sensor, foi necessário construir um sistema onde a quantidade de água presente na amostra de solo fosse o único parâmetro variável na experiência. Logicamente, esta variação deveria ser monitorada

através de um método bastante preciso. Com este sistema construído, tornou-se viável levantar uma curva que relaciona a tensão elétrica de cada sensor como uma função da massa relativa de água contida no solo (massa de água / massa total). Outras informações importantes também puderam ser obtidas a partir dos dados mencionados anteriormente.

Como objetivo de estabelecer esta relação, construiu-se um recipiente fechado com tela na extremidade inferior e aberto na extremidade superior, para armazenar as amostras de terra ou de areia utilizadas na aferição do sistema. A representação esquemática do recipiente de calibração é apresentada na Figura 6.

Figura 6: Representação esquemática do recipiente de calibração do sensor.



Este sistema tem diâmetro interno igual a 102 mm, diâmetro externo igual a 113 mm e altura igual a 161 mm. A função da tela é dar sustentação à amostra de terra ou areia utilizada para a calibração, permitindo que a água escoe para fora do recipiente quando a quantidade máxima de umidade que o solo é capaz de armazenar for atingida. Juntamente com a tela, um tecido de náilon foi colocado para fechar o recipiente, impedindo assim que as partículas de pequeno tamanho fossem levadas pela água, uma vez que a malha da tela utilizada é de cerca de 1 mm². O recipiente foi suspenso por um suporte, também para permitir o livre escoamento da água através da tela. Em cada experimento, o sensor foi pesado para que sua massa pudesse ser desconsiderada nos resultados.

O sistema descrito acima foi colocado em uma balança de precisão. Uma quantidade da amostra de solo seco foi colocado no recipiente, com o sensor devidamente instalado e energizado. A massa do sistema

e a tensão elétrica inicial no sensor foram anotadas e em seguida, pequenas quantidades de água aplicadas, de forma homogênea, foram introduzidas em intervalos de dois minutos, suficientes para que o sistema atingisse o estado de equilíbrio. Nesta situação foi medida novamente a massa do sistema e a tensão fornecida pelo sensor. Com os dados obtidos construiu-se uma tabela para cada tipo de solo ensaiado, relacionando a massa do sistema com a tensão elétrica fornecida pelo sensor. A partir destes dados, outras relações foram obtidas. As medidas experimentais geradas pelo sistema de calibração são apresentadas a seguir.

Sensor Construído com dielétrico de gesso

Todos os sensores foram construídos e tiveram seu desempenho analisado. Como exemplo serão apresentados os resultados obtidos com o sensor de gesso.

Para isto, adicionou-se de terra ao recipiente de calibração juntamente com o sensor que utiliza gesso. As medidas apresentadas na Tabela 2 foram obtidas com a adição gradual de água.

Tabela 2: Relação entre a massa do sistema e a tensão elétrica no sensor de gesso com $Rd = 1.526$, utilizando-se terra.

$m_{\text{Sistema}} - [\text{g}]$	$V_{\text{sensor}} - [\text{v}]$	$m_{\text{Sistema}} - [\text{g}]$	$V_{\text{sensor}} - [\text{v}]$
1126,50	1,560	1254,00	0,110
1151,50	1,235	1279,00	0,087
1173,00	0,945	1298,50	0,072
1190,50	0,618	1321,50	0,049
1213,00	0,386	1350,50	0,036
1232,00	0,184	1359,00	0,028

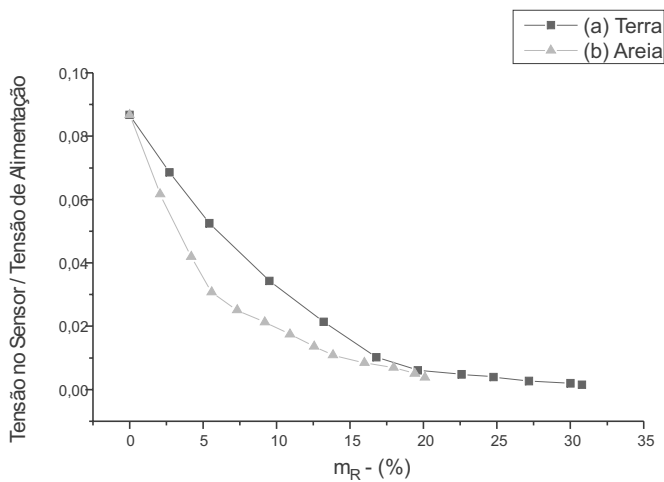
Neste experimento, também é possível observar a partir da tabela, que a tensão elétrica no sensor varia de forma coerente com a massa de água contida no sistema.

Com o mesmo sensor de gesso, utilizou-se uma amostra de 710 g de areia. Os dados obtidos neste ensaio são apresentados na Tabela 3. Uma maior quantidade de pontos foram obtidos neste ensaio devido à necessidade de maior quantidade de água para atingir a saturação da amostra de areia. Este fato é justificado, pois uma maior massa de areia foi utilizada para calibração deste sensor.

Tabela 3: Relação entre a massa do sistema e a tensão elétrica no sensor de gesso com $Rd = 1.526$, utilizando areia.

$m_{Sistema} - [g]$	$V_{sensor} - [v]$	$m_{Sistema} - [g]$	$V_{sensor} - [v]$
1314,00	1,560	1416,00	0,244
1329,00	1,110	1428,00	0,197
1345,00	0,755	1449,00	0,153
1356,00	0,552	1469,50	0,125
1370,00	0,451	1485,00	0,091
1386,00	0,383	1492,50	0,069
1401,00	0,315		

Figura 7: Relação entre m_R e V_{sensor}/V_s para o sensor de gesso, com $Rd = 1.526$. (a) Curva referente a amostra de terra. (b) Curva referente a amostra de areia.

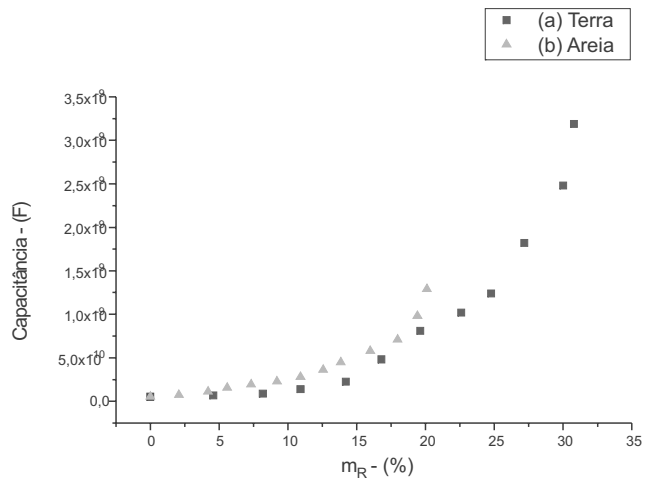


De fato, realizando a pesagem do sensor após o processo de calibração, seu incremento de massa associado à presença de água foi de 17 g, enquanto o sensor de pedra com $Rd = 3.75E-1$ sofreu um incremento de 8 g, fato este que explica a diferença no ponto de saturação encontrado.

A Figura 7, ilustrada acima, apresenta a relação existente entre porcentagem relativa de água presente no solo e a tensão de saída normalizada do sensor de gesso ($Rd = 1.526$), utilizando-se a amostra de terra.

Deseja-se verificar também a variação da capacitância do sensor com a massa de água no solo. Este gráfico é apresentado na Figura 8.

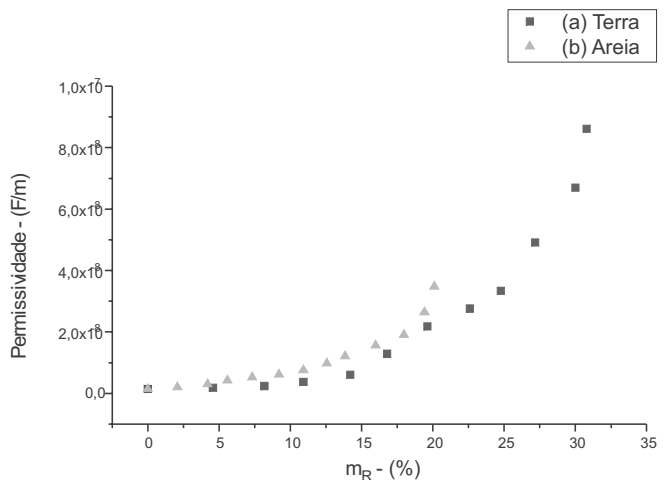
Figura 8: Relação entre m_R e C para o sensor de gesso, com $Rd = 1.526$. (a) Curva referente a amostra de terra. (b) Curva referente a amostra de areia.



A Figura 9 apresenta a relação entre a permissividade elétrica do meio e a massa de água presente no solo. Novamente, este gráfico possui o comportamento semelhante à Figura 8, devido a forma como a capacitância elétrica e a permissividade elétrica se relacionam.

O sensor calibrado acima, com dielétrico de gesso e $Rd = 1.526$, possui o maior fator Rd utilizado neste estudo. Assim, como mencionado anteriormente, quando a distância entre as placas do capacitor é significativa em relação ao raio das mesmas, a teoria desenvolvida na Seção 3 não pode ser aplicada com precisão devido as distorções ocorridas na forma do campo elétrico existente.

Figura 9: Relação entre m_R e ϵ_r para o sensor de gesso, com $Rd = 7.674E-1$. (a) Curva referente a amostra de terra e (b) curva referente a amostra de areia.



Desta forma, a não linearidade observada na Figura 8 se deve provavelmente a estas distorções no campo elétrico que invalidam a Equação (7). Este fato, também, é observado de forma semelhante na Figura 9. Porém, este aspecto não inviabiliza a aplicação do mesmo na medida da umidade relativa presente no solo. Entretanto, a característica de independência do tipo de amostra não pode ser considerada neste caso.

Após a realização do procedimento experimental, algumas reflexões sobre as características de operação dos sensores são válidas. Deve-se verificar que este trabalho apresenta uma idéia introdutória para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento da umidade no solo. A repetibilidade dos resultados experimentais foi verificada neste trabalho. Porém, outras características dos sensores não foram analisadas devido a não disponibilidade de equipamentos adequados para a verificação de alguns aspectos experimentais.

Inicialmente, tomando como base uma balança digital como instrumento de referência, verificou-se que a incerteza das medidas realizadas experimentalmente não superou 0,5% sendo considerada suficientemente precisa para a aplicação proposta neste trabalho. Porém, a aplicação de um instrumento de alta precisão pode melhorar a qualidade dos dados obtidos.

Outra consideração importante diz respeito a compactação do solo. Neste trabalho, as amostras utilizadas foram homogeneizadas de forma que a compactação natural foi removida. Assim, é interessante aplicar um processo de calibração que considere a compactação presente no solo analisado.

A histerese característica dos sensores não foi analisada devido a dificuldades inerentes ao procedimento de calibração adotado. Para verificar este comportamento nos sensores construídos, é necessário que exista um controle mais preciso sobre a quantidade de água presente nas amostras utilizadas através da aplicação de uma câmara com umidade controlada.

Finalmente, para melhorar a qualidade dos dados experimentais obtidos é possível construir um capacitor vedado, com as mesmas características do sensor analisado para montar um circuito em ponte para compensação de efeitos indesejáveis devidos a alterações ambientais.

Neste caso, os efeitos de distorção que podem prejudicar as medidas, alteram de forma similar, os dois capacitores do circuito. Assim, o equilíbrio existente na ponte faz com que estes efeitos sejam anulados.

■ Conclusões

Comparando-se os resultados obtidos, os sensores de melhor aplicabilidade são o que possui dielétrico de gesso com $Rd = 2.162E-1$ e o sensor que possui dielétrico de pedra pome com $Rd = 3.75E-1$, uma vez que o comportamento destes sensores apresentam menor sensibilidade às características da amostra e a distorção ocorrida em relação ao comportamento teórico esperado foi menor. A precisão das medidas pode ser aumentada, utilizando-se uma balança mais precisa, uma vez que este instrumento é considerado a base da calibração. Desta forma, os erros inerentes à balança são de difícil caracterização. Com a utilização de uma balança eletrônica e de uma câmara com umidade controlada, o processo de calibração destes sensores seria significativamente mais preciso, uma vez que as medidas seriam realizadas com maior confiabilidade. Entretanto, observa-se que os resultados obtidos são bastante satisfatórios para aplicações práticas.

Assim, os dados retirados do sistema mostram que a aplicação de sensores capacitivos para o monitoramento da umidade no solo é bastante viável, principalmente porque além de responder adequadamente a variação de água no meio analisado, estes sensores são praticamente imunes à variações de temperatura ocorridas dentro da faixa ambiental. Esta característica garante uma considerável estabilidade à aplicação dos sensores capacitivos.

■ Referências Bibliográficas

- BORIM, A. C. A. Modelo a Objetos para Sistemas Abertos de Informações para Gerenciamento de Propriedades Voltadas à Produção de Leite. 2003.198 páginas. Tese de Doutorado em Engenharia de Controle e Automação. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- CARDOSO, Flávio H.. Sensor Térmico para Medição da Tensão de Água no Solo. 1994. 156 páginas. Universidade de Brasília, Brasília.
- DESOER, Charles A. e KUH, Ernest S.; *Teoria Básica de Circuitos*, Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.
- EDMINISTER, Joseph A.; *Circuitos Elétricos*, São Paulo: McGraw-Hill, 1985.
- HAYT, William H., Jr.; *Eletromagnetismo*, Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1983.
- HALLIDAY, D; RESNICK, R. & WALKER, W. *Fundamentos de Física*. volume 1 - 6a edição Rio de

Janeiro: LTC Editora, 2002.

KERCHNER, Russell M.; CORCORAM, George F. *Circuitos de Corrente Alternada.*, Porto Alegre: Editora Globo, 1973.

OGATA, K.; *Engenharia do Controle Moderno*. Rio de Janeiro: Prentice/Hall do Brasil, 1990.

PINTO, C. A. R. Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento à Distância de Umidade no Solo. 1996. 102p. Dissertação de Mestrado na área de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.