

SENSOR CAPACITIVO PARA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA¹

CLEMENTE JOSÉ GUSMÃO CARNEIRO², CARLOS ALBERTO BRAYNER DE OLIVEIRA LIRA³,
JOSÉ AUGUSTO MENDES SOBRINHO⁴, ANTÔNIO CELSO DANTAS ANTONINO⁵
e FERNANDO LOBO VAZ DE MELLO⁶

RESUMO - Um sensor de nível de água, baseado em um fio esmaltado, foi desenvolvido. A água e o cobre são as placas dos capacitores e o esmalte o dielétrico. Nove sensores, com fios de vários diâmetros e tipos de isolantes foram calibrados individualmente. Para cada fio foi calculada uma regressão linear entre os níveis de água e as respectivas capacitâncias. Todos os coeficientes de determinação tiveram valores próximos da unidade. A capacitância do fio variou entre 37,3 e 84,3 pF/cm.

Termos para indexação: instrumentação, fio esmaltado de cobre, dielétrico.

CAPACITANCE SENSOR FOR MEASURING WATER LEVEL

ABSTRACT - A water level sensor, based on a varnished copper wire, was developed. Water and copper are the plates of the capacitor, and the varnish, the dielectric. Nine sensors with wires of different diameters were individually calibrated. For each wire, a linear regression was calculated between the water levels and their respective capacitances. All of the determination coefficients showed values near to the unity. Capacitance of wire ranges from 37.3 to 84.3 pF/cm.

Index terms: instrumentation, varnished copper wire, dielectric.

INTRODUÇÃO

Precipitação, infiltração, evaporação e profundidade do lençol freático são algumas das variáveis hidrológicas que podem ser obtidas pela medida do nível de água. Essas variáveis são amplamente usadas em várias áreas das ciências ambientais. O conhecimento dessas variáveis em função do tempo é também usado para validar modelos de transferência de água e solutos no perfil de solo.

As medidas de nível de líquidos podem ser realizadas por meio de diversos métodos. Elfers & Johnson (1974) fizeram uma extensa revisão do assunto e apresentaram desde métodos diretos mais

primitivos, como os visuais, que usam um gancho, até aqueles baseados na atenuação das radiações nucleares. Nesse trabalho deu-se ênfase aos métodos baseados na lei do empuxo, como os que usam flutuadores que acionam mecanismos de indicação de nível. Dos métodos eletrônicos, destacam-se os que se baseiam na emissão e reflexão de ondas sônicas e os que usam ondas ultra-sônicas que se atenuam à medida em que o nível de água aumenta. Nesse grupo de detectores encontram-se os baseados nas variações de capacitância elétrica com o nível do líquido, que funciona como o dielétrico do capacitor.

Constantz & Murphy (1987) apresentaram as dificuldades relativas à construção de um transdutor de nível de água utilizando um sensor de pressão. Eles ressaltaram, também, que a qualidade da água associada aos problemas de manutenção e de calibração pode introduzir erros significativos nas medidas.

A maioria dos sistemas automáticos usa técnicas eletrônicas avançadas para processar e transmitir medidas feitas pelos mesmos tipos de sensores, que vêm sendo utilizados há várias décadas (Hoehne, 1985). Nesse sentido, Mendes Sobrinho (1987) de-

¹ Aceito para publicação em 29 de outubro de 1996.

² Eng. Elétr., Ph.D., Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), DEN-EE, Av. do Contorno 842/920, CEP 30110-060 Belo Horizonte, MG. Bolsista do CNPq.

³ Eng. Elétr., Ph.D., Prof. Adj., Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), DEN-CT, CEP 50540-740 Recife, PE.

⁴ Físico, M.Sc., UFPE.

⁵ Eng. Civil, Ph.D., Prof. Adj., UFPE.

⁶ Eng. Mec., Ph.D., Prof. Adj., UFMG.

desenvolveu um novo modelo de sensor capacitivo para medição de nível da água. O objetivo do presente trabalho é mostrar o desenvolvimento desse sensor, sua viabilidade técnica e precisão para medir o nível de água.

MATERIAL E MÉTODOS

Um fio de cobre esmaltado quando imerso em água com uma das extremidades isolada, torna-se um capacitor. O cobre e a água funcionam como placas, e o revestimento esmaltado como dielétrico. O conjunto forma, então, um capacitor cilíndrico, cuja capacitância é variável com o nível de água.

A capacitância desse capacitor cilíndrico pode ser obtida através da equação:

$$C = \frac{2\pi k_0 k d}{\ln\left(1 + \frac{e}{r}\right)}$$

onde,

$k_0 = 8,858 \cdot 10^{-2}$ pF/cm, constante dielétrica do vácuo;
 k = constante dielétrica do esmalte em relação à do vácuo;
 d = nível de água a partir da extremidade do fio (cm);
 r = raio do fio de cobre (cm);
 e = espessura do esmalte (cm);
 C = capacitância (pF).

A partir dessas considerações teóricas, foi construído um sensor de nível, consistindo de um fio de cobre esmaltado, esticado e enrolado entre dois cilindros de borracha fixos nas extremidades de um tubo metálico (Fig. 1).

Nove fios foram usados na construção dos sensores de nível. Esses sensores foram calibrados conforme o arranjo mostrado na Fig. 1, onde variou-se o nível de água, introduzindo-se sucessivamente volumes de 20 mL de água na proveta, através de uma pipeta de precisão. Para cada variação de nível na proveta mediu-se a capacitância do sensor com o capacímetro digital. Após atingir um determinado nível, repetiu-se o procedimento retirando-se volumes de água da proveta. O método de regressão linear foi usado para ajustar as medidas das capacitâncias elétricas e os níveis de água de cada sensor, obtendo-se dessa maneira sua curva de calibração.

Essas curvas foram repetidas diversas vezes durante seis meses, mantendo-se os sensores imersos em água para testar se o efeito prolongado da água no verniz provocava variações das retas de calibração.

Os fios foram classificados segundo a AWG (American Wire Gage). A espessura do esmalte de cada fio foi determinada subtraindo-se do raio do fio de cobre esmaltado, o raio do mesmo fio sem esmalte. De acordo com Croop

(1968), os fios de cobre usados na construção de transformadores, bobinas e outros dispositivos elétricos, e que não requerem um funcionamento severo em altas temperaturas, são revestidos de resina de poliéster. O valor de k dessa resina varia entre 4,4 e 8,1 (Gainer, 1968). Como não é conhecido o tipo de resina de cada fio, calculamos um valor de k através do ajuste por mínimos quadrados das capacitâncias teóricas e experimentais dos diversos fios.

Com o objetivo de verificar o efeito da concentração de sais na resposta do sensor de nível, foram efetuadas medidas de capacitância e de condutividade elétrica com o sensor imerso a um nível constante de água destilada, desmineralizada e de torneira. Estudou-se ainda o comportamento do sensor em diferentes concentrações de NaCl em água destilada.

Finalmente, a água foi aquecida até 100°C para estudar possíveis variações da capacitância com a temperatura da água.

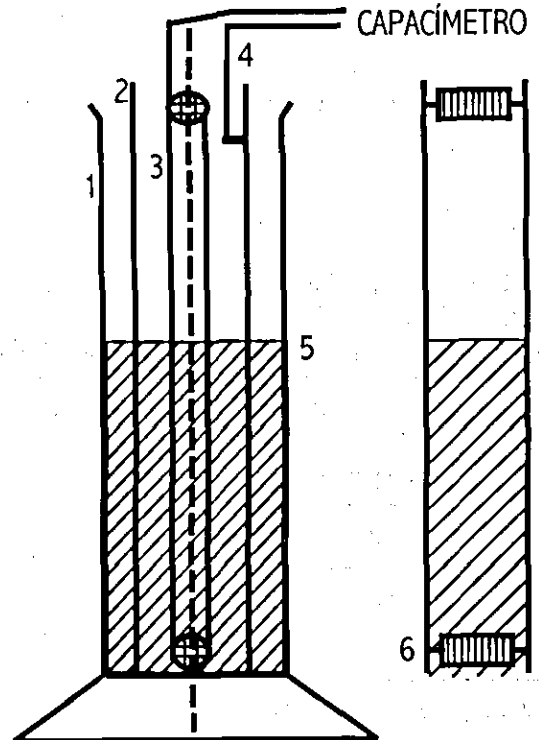


FIG. 1. Cortes verticais mostrando o sensor capacitivo para medida de nível: 1) Proveta com água; 2) Tubo metálico; 3) Fio esmaltado; 4) Terminais do capacitor (cobre e tubo metálico em contato com água); 5) Nível de água em contato com o verniz; e 6) Cilindro de borracha para fixar o fio esmaltado.

As medidas de capacitância elétrica foram feitas com um capacímetro comercial, modelo B & K Precision 820 Digital, Dynascan Corporation, USA, com intervalo de medida de 0,1 picofarad a 1 farad, e as medidas de condutividade elétrica da água, com um condutivímetro modelo E-527, da Metrohm Hensan, com intervalo de medida de 1 μ siemens a 10 milisiemens.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A capacitância por unidade de comprimento de cada fio, obtida através das declividades das retas de calibração dos sensores, variou de 37,3 a 84,3 pF/cm. Os parâmetros dessas retas, obtidos pela regressão linear entre o nível da água na proveta e a capacitância medida, são mostrados na Tabela 1. Em todos os fios, os valores dos coeficientes de determinação (R^2) foram próximos da unidade. Isto demonstra que o diâmetro e a espessura do esmalte não variam significativamente ao longo de cada fio e que todos os fios testados podem ser usados como sensores de nível. As medidas de capacitância não variaram quando se colocava ou retirava sucessivamente 50 mL da proveta graduada, mostrando, assim, a inexistência de variações da superfície molhada contínua dos fios de cobre com o sentido do deslocamento da água.

O capacímetro comercial utilizado nas medidas de capacitância possui quatro dígitos. Porém, nas medidas de capacitância e em qualquer fundo de

escala, os sensores apresentaram flutuações de até 5 pF independente do valor da capacitância medida. Dessa maneira, com um sensor de 100 pF/cm, constituído de uma única espira, foi possível medir variações de nível de água de até 0,5 mm. Variações ainda menores de níveis, da ordem de 0,1 mm, foram medidas por Vasconcelos (1989) utilizando um sensor capacitivo de mais de 500 pF/cm constituído de várias espiras de fio esmaltado.

Elfers & Johnson (1974) apresentaram uma extensa tabela onde selecionaram medidores de nível de líquidos, segundo o princípio de operação, intervalo de níveis, acurácia, aplicações e limitações. A melhor acurácia apresentada pelos medidores relacionados foi de 1%. Todavia o sensor proposto pode medir níveis de água com acurácia de 0,1% quando as capacitâncias medidas forem maiores que 5000 pF. Além disso, nenhum dos sensores citados possui um princípio de operação simples associado a uma resposta linear, como o sensor capacitivo.

Os valores de k foram determinados com $k=4,62$, número que minimiza a relação $\Sigma(a_i - a)^2$. As diferenças observadas entre a_i e a , Tabela 1, devem ser atribuídas à variabilidade do valor calculado de a_i . Esse valor foi calculado com o k ajustado, não se levando em consideração a variabilidade do verniz nem os erros introduzidos pela medida da espessura de cada fio com o paquímetro. Vale ressaltar que o estudo detalhado do tipo de verniz não é o objetivo do presente trabalho já que todos os sensores foram construídos a partir de fios esmaltados comerciais. E, além disso, grande parte do processo de fabricação desses fios é mantida em segredo (Croop, 1968).

Os resultados da Tabela 2 indicam que para um mesmo nível de água, a capacitância depende da concentração de sal da água e do tipo de água. Nenhuma variação da capacitância dos sensores foi observada quando a condutividade elétrica da água variou de 0,01 a 18,2 mS/cm.

Finalmente, a capacitância dos sensores não variou quando imersos em água por seis meses nem quando se aumentou a temperatura da água para 90°C. Esses resultados sugerem que esses sensores podem ser usados em equipamentos de campo para automatizar medidas de nível da água em regiões semi-áridas.

TABELA 1. Capacitância por unidade de comprimento de cada fio: experimental (a_i); teórico (a); desvio padrão (σ_a); relação entre a espessura do esmalte e o raio do fio (e/r), e coeficiente de determinação (R^2) para os diversos tipos de fios.

Fio	a	σ_a	a_i	e/r	R^2
	pF/cm			%	
8	62,3	0,13	80,9	3,24	0,9999
11	71,1	0,24	63,0	4,18	0,9998
13	74,2	0,40	67,6	3,89	0,9996
14	84,3	0,31	82,2	3,19	0,9998
15	76,2	0,30	76,8	3,42	0,9998
16	38,4	0,11	38,4	6,95	0,9999
17	59,3	0,23	61,4	4,29	0,9998
18	37,3	0,19	35,9	7,46	0,9996
19	60,3	0,28	50,2	5,28	0,9996

TABELA 2. Condutividade elétrica (ce) e capacitância (cp) de água destilada em várias concentrações de NaCl (c), água desmineralizada e água potável.

Água	c (g/mL)	cp (pF/10)	ce (mS/cm)
Destilada	0,0000	52±0,5	<0,01
Destilada	0,0006	52±0,5	0,11±0,005
Destilada	0,0013	52±0,5	0,70±0,005
Destilada	0,0020	52±0,5	1,07±0,01
Destilada	0,0026	52±0,5	2,01±0,02
Destilada	0,0033	52±0,5	5,08±0,005
Destilada	0,0066	52±0,5	8,52±0,005
Destilada	0,0100	53±0,5	12,30±0,1
Destilada	0,0133	52±0,5	15,58±0,1
Destilada	0,0166	53±0,5	18,20±0,1
Desmineralizada	-	52±0,5	<0,01
Potável	-	53±0,5	0,044±0,0002

CONCLUSÕES

1. A medida do nível independe da salinidade e da temperatura da água.
2. Aumentando-se o nível medido aumenta-se a acurácia dessa medida, podendo-se atingir valores menores que 0,1%.
3. O sensor capacitivo de nível pode ser usado na construção de pluviômetros, evaporímetros, linígrafos e outros equipamentos para medidas automatizadas de variáveis hidrológicas.

REFERÊNCIAS

- CONSTANTZ, J.; MURPHY, F. An automated technique for measurements from mariotte reservoirs. *Soil Science Society of America. Journal*, v.51, p.252-254, 1987.
- CROOP, E.J. Insulating varnishes In: FINK, D.G.; CARROL, J.M. (Eds.). *Standard handbook for electrical engineers*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1968. Ch.4, p.202-207.
- GAINER, G.C. Impregnating and filling compounds. In: FINK, D.G.; CARROL, J.M. (Eds.). *Standard handbook for electrical engineers*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1968. Ch.4, p.209-213.
- ELFERS, P.A.; JOHNSON, C.M. Liquid-level measurement. In: CONSIDIDE, D.M. (Ed.). *Process instruments and controls handbook*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1974. Ch.5, p.1-43.
- HOEHNE, W.E. Measurements tomorrow. In: HOUGHTON, D.D. (Ed.). *Handbook of Applied Meteorology*. New York: John Wiley & Sons, 1985. Ch. 6, p.329-340.
- MENDES SOBRINHO, J.A. *Desenvolvimento de um sistema automático para medida de evaporação em tanques de classe A*. Recife: UFPE, 1987. 57p. Tese de Mestrado.
- VASCONCELOS, A.O. *Desenvolvimento de um sistema automático de medidas de evaporação e precipitação*. Recife: UFPE - Departamento de Energia Nuclear, 1989. 52p. Tese de Mestrado.