



DESCRIÇÃO DE UM SENSOR PARA MEDIR SIMULTANEAMENTE A CONDUTIVIDADE E O NÍVEL DE ÁGUA.

*Antonio A B. Ribeiro*¹

¹ Instituto Federal de Educação e Tecnologia de São Paulo, Salto, Brasil, ribeiroa@terra.com.br

Resumo: Este artigo apresenta um sensor para medir simultaneamente a condutividade e o nível de água. O sensor é do tipo capacitivo com quatro eletrodos. Nas extremidades do sensor é aplicado um sinal senoidal e a propagação da onda na água é captada e utilizada para medir a condutividade. Medidas da condutividade entre $0,5 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ a $0,25 \times 10^{-1} \text{ S/m}$ foram realizadas com boa precisão. A capacitância do sensor depende do nível de água. Este recurso é utilizado para medir o nível de água do sistema, neste caso entre 4cm a 19cm. Estudos futuros deveram ser realizados para utilizar este sensor em fluxo contínuo de água.

Palavras chave: condutividade elétrica, sensor capacitivo, nível de água, sistema microprocessado.

1. INTRODUÇÃO

Neste artigo descreve-se um sensor para medir simultaneamente a condutividade e o nível de água. Em geral essas grandezas são medidas por sensores distintos. No entanto, será descrito a seguir, a construção de um sensor e o sistema de aquisição, para medir simultaneamente essas duas grandezas.

A condutividade elétrica da água é a capacidade que a água possui em conduzir corrente elétrica. Esse parâmetro está relacionado com a presença de íons dissolvidos na água, sendo íons as partículas carregadas eletricamente. Quanto maior a presença desses íons, maior a condutividade. Outros fatores alteram a condutividade, um dos mais importantes é a temperatura. Acréscimo de um grau de temperatura provoca um aumento de mais ou menos 2% na condutividade[1]. Portanto, a temperatura deve ser mantida controlada para se obter uma boa precisão na medida da condutividade.

A medida da condutividade da água tem grande importância na análise de impacto em ambientes naturais. Pois, apesar da condutividade não determinar especificamente quais íons estão presentes numa amostra de água, é possível reconhecer através da concentração de íons, impactos que ocorreram na bacia de drenagem, ocasionados por lançamentos de resíduos industriais, minas e esgotos, entre outros fatores.

Os sensores utilizados para medir a condutividade são classificados basicamente em dois tipos: sensores de

contacto e sensores indutivos. Os sensores de contactos possuem dois, três ou quatro eletrodos. Através de um circuito série, formado pela resistência da água, e resistores de valores conhecidos, é possível obter a condutância da água. A condutividade depende da condutância assim como da geometria do sensor. Através destes parâmetros é possível obter a condutividade da água. Já os sensores indutivos, também denominados de sensor sem contacto, utilizam duas bobinas. Uma bobina induz corrente elétrica na água, e uma segunda bobina capta parte do sinal induzido. A corrente induzida é proporcional a condutividade da água[2].

O sensor desenvolvido neste artigo é do tipo de contacto com quatro eletrodos. Optou-se por este sensor por ser de fácil construção, baixo custo, e boa linearidade numa faixa extensa de medição.

A medição do nível de líquidos tem grande importância para diversos setores da indústria, assim como para as atividades agropecuárias. Mais recentemente, vários segmentos da sociedade, tem de uma certa forma sofrido com a brusca elevação do nível de água, com grande impacto na economia. Portanto, é de grande importância a medição segura e o controle eficaz dos níveis de água nas diferentes atividades exercidas na sociedade.

Existem, atualmente na literatura, uma variedade de métodos para medir o nível de líquido. Alguns utilizam o método direto, por exemplo, o uso de régua, ou escala graduada, ou também bóias e flutuadores. Em contrapartida outros processos utilizam o método indireto. Pode-se citar nesta categoria a medição da pressão hidrostática, reflexão de ondas ultra-som, método capacitivo[3].

Neste trabalho é apresentado um sistema de medição valor do nível de líquido através do método capacitivo. A utilização do método capacitivo deve-se à facilidade de construção do sensor, e baixo custo[4].

2. METODOLOGIA

Nesta seção será descrito o método utilizado para se obter simultaneamente a condutividade e o nível de água. Primeiro, será descrito a solução analítica para se obter as duas grandezas. Em seguida, descreve-se o sistema de condicionamento e aquisição de sinais. E finalmente é mostrado o fluxograma para calcular a condutividade e o nível de água.

2.1 Solução Analítica

O sensor é constituído por duas placas de cobre dispostas paralelamente. Nas extremidades é aplicado um sinal senoidal que se propaga no meio condutor. Dois eletrodos inseridos entre as placas captam a onda que se propaga e são utilizados para medir a condutividade. Na base tem-se um sensor para medir a temperatura. A Figura 1 mostra o sensor desenvolvido.

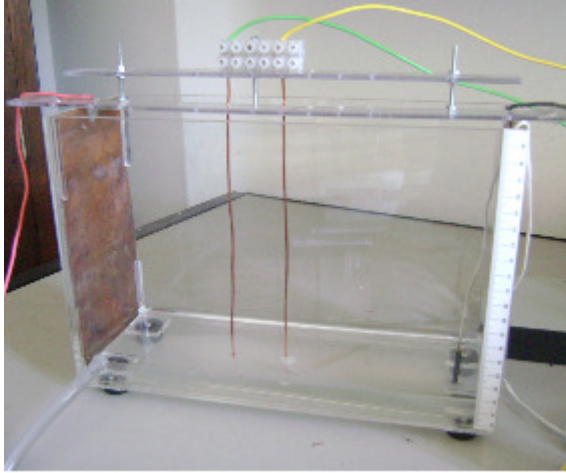


Figura 1 – Sensor para medir condutividade e nível da água.

Com o objetivo de investigar a propagação da onda no meio condutor, será utilizado o sistema de coordenadas retangulares conforme a Figura 2. As placas de cobre estão localizadas nas coordenadas $x=0$ e $x=L$, onde um sinal senoidal de frequência angular ω é aplicado. Utilizando-se a equação de Maxwell [5] para um meio condutor pode-se escrever a seguinte expressão:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \sigma\mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

μ = permeabilidade elétrica, $H \cdot m^{-1}$;

σ = condutividade elétrica, $S \cdot m^{-1}$;

ϵ = permissividade elétrica, $F \cdot m^{-1}$.

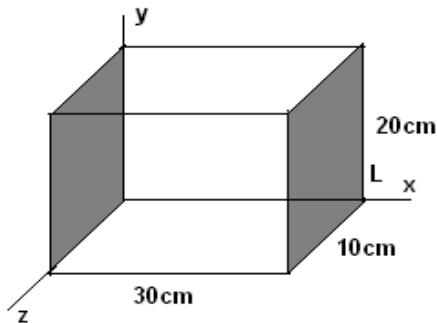


Figura 2 – Dimensões do sensor e localização das placas de cobre.

A solução desta equação é dada por:

$$E_x(x, t) = E_0 e^{\alpha x} e^{j(\alpha x + \omega t)} \quad (2)$$

Para o meio condutor $\sigma \gg \omega\epsilon$ e α vale:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (3)$$

O campo elétrico em função da distância é dado por:

$$E_x(x) = \text{Re}[E_0 e^{\alpha x} e^{j(\alpha x)}] = E_0 e^{\alpha x} \cos(\alpha x) \quad (4)$$

e o potencial elétrico pode ser obtido por:

$$V(x) = \frac{E_0 e^{\alpha x} (\cos \alpha x + \sin(\alpha x) - 1)}{2\alpha} \quad (5)$$

No entanto, conforme será mostrado no próximo parágrafo, $\alpha x \ll 1$, nestas condições o potencial elétrico varia linearmente em função da distância x , ou

$$V(x) = V_0 \alpha x \quad (6)$$

Portanto, a diferença de potencial medida entre dois pontos do meio condutor, contém informação sobre a condutividade do meio, de acordo com a equação (3).

A condutância, entre dois eletrodos localizados dentro da água, é dada por:

$$G = \frac{i}{v} \quad (7)$$

A condutividade depende também da geometria do sensor sendo calculada através da equação:

$$\sigma = K_C G \quad (8)$$

onde K_C é a constante da célula (m^{-1}). Esse parâmetro é em função das dimensões do sensor e pode ser calculado pela equação:

$$K_C = \frac{L}{A} \quad (9)$$

sendo A a área do sensor, e L comprimento. Com as medidas do sensor da Figura 2 obtêm-se a constante de célula no valor de $K_C = 15 m^{-1}$. Para o sistema, deseja-se medir a condutividade na faixa de valores entre $0,5 \times 10^{-2} S/m$ a $0,25 \times 10^{-1} S/m$, e a distância entre os eletrodos é de 4cm, o que implica na resistência do meio condutor, R_C , de 100Ω a 200Ω . Este parâmetro, conforme será visto a seguir, tem influencia sobre o cálculo do nível de água.

O segundo parâmetro a ser medido é o nível de água. O objetivo é obter a expressão que relacione o valor da tensão sobre um resistor com o nível de água. Utilizou-se um

resistor em série com o sensor conforme mostra a Figura 3. Então podemos escrever que a tensão sobre o resistor R é:

$$V_R = \frac{V \times R}{\sqrt{(R + R_C + R_S)^2 + X_C}} \quad (10)$$

onde V é a tensão na saída do conversor digital analógico.

O valor do resistor R deve ser escolhido de tal forma que as seguintes expressões sejam válidas:

$$R \gg (R_S + R_C) \quad \text{e} \quad X_C \gg R$$

nestas condições :

$$V_R = 2\pi f C_X R V \quad (11)$$

O capacitor C_X é proporcional ao nível do líquido, portanto ao medir a tensão sobre o resistor R tem-se informação do nível de água. Devido a distância entre as placas, L, ser maior do que um dos lados do capacitor, então o efeito das bordas interfere no valor da capacitância, sendo calculada pela equação abaixo

$$C_X = \frac{\epsilon A}{L} + \frac{2d\epsilon}{\pi} \ln\left(\frac{\pi d}{L}\right) \quad (12)$$

onde d é a largura do capacitor. A área pode ser expressa em função do nível, ou seja:

$$A = h * d \quad (13)$$

Portanto, a partir da equação (12) podemos verificar que a capacitância varia de forma linear em função do nível de água, e o efeito das bordas é de apenas aumentar o valor da capacitância.

O capacitor C_X é constituído por dois capacitores em paralelo. Um dos capacitores é o formado pelo meio ar, C_{X0} , e outro pelo meio condutor, C_{X1} . Através da equação (12) pode-se estimar o valor da capacitância C_X . Para a faixa de utilização do sensor, o nível varia entre 4 a 19 cm, o valor obtido para a capacitância situa-se entre 12pF a 47pF. O valor do resistor R deve ser escolhido de tal forma que para o valor do maior capacitor, 47pF, a impedância seja pelo menos 10 vezes maior do que a resistência R.

2.2 Sistema de aquisição

O diagrama em blocos do sistema de aquisição é mostrado na Figura 3. O microcontrolador Aduc812, fabricado pela AnalogDevices, é o responsável por gerar o sinal senoidal, pelo tratamento das entradas analógicas, e envio dessas informações para o microcontrolador PIC16F877. O sinal gerado pelo Aduc812 é uma onda senoidal de frequência de 1000Hz e amplitude máxima de 5V. Este sinal está disponível na saída do conversor digital-analógico(D/A), e é aplicado no sensor, representado pelo capacitor C_X . O sinal senoidal, descrito na equação (2) é captado em três pontos distintos. O resistor R_C representa a dificuldade da corrente em conduzir na água. Já R_S é um resistor de baixo valor utilizado para obter a corrente do circuito, e através da tensão no resistor R medi-se o nível de água. Conforme citado na introdução, a temperatura da água deve ser monitorada. Um sensor de temperatura do tipo

NTC foi utilizado para esta finalidade. Através de um resistor em paralelo com o sensor de temperatura, foi possível obter variações de tensões lineares em função da temperatura, na faixa de 20°C a 40°C. Todos esses dados são processados nas entradas analógicas do microcontrolador Aduc812.

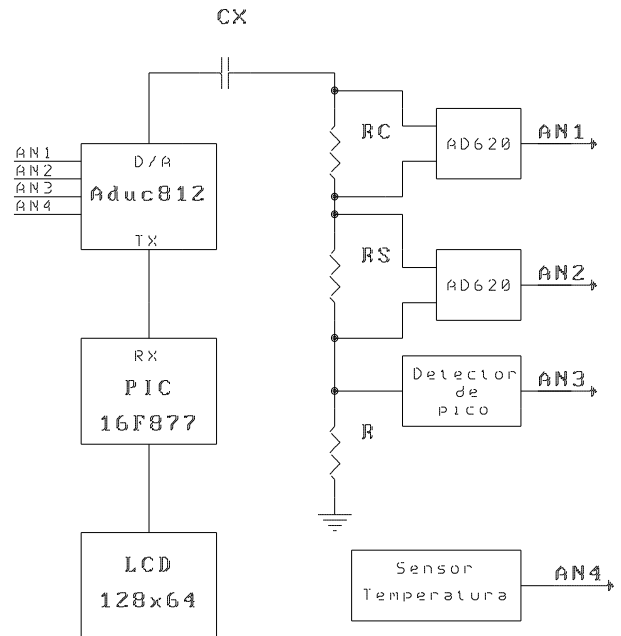


Figura 3 – Diagrama em blocos do sistema de aquisição.

Devido a baixa frequência do oscilador do Aduc812, utilizou-se um cristal de 11,0592MHz, e também pelo fato do mesmo gerar e adquirir dados em tempo crítico, foi necessário a utilização de um segundo microprocessador, neste caso o PIC16F877, da Microchip. Esse microprocessador recebe informações do Aduc812, à intervalos regulares, através da porta serial, e após processamento exibe os dados no LCD (“Liquid Cristal Display”) gráfico de 128 colunas e 64 linhas. As informações disponíveis são: temperatura, condutividade e o nível da água.

2.3 Cálculo da condutividade e do nível da água

O fluxograma da Figura 4 mostra as etapas necessárias para se obter a condutividade e o nível de água. A intervalos regulares são feitas leituras nas entradas analógicas AN1 a AN4. O primeiro valor a ser processado é a corrente. Através do valor da entrada AN2 e do $R_S = 50\Omega$, esse valor foi escolhido de forma a não influir na obtenção do nível da água, calcula-se a corrente que passa no condutor. Na seqüência obtêm-se a condutância e a constante de célula K_C . De posse desses valores calcula-se a condutividade.

O nível da água h, é proporcional ao valor da entrada analógica AN3, e para expressar essa grandeza em centímetros é necessário dividi-la pela constante k_2 . Procedimento semelhante é feito com a grandeza

temperatura. Após calcular a condutividade, o nível da água e a temperatura, esses dados são exibidos no LCD, e uma nova aquisição é realizada.

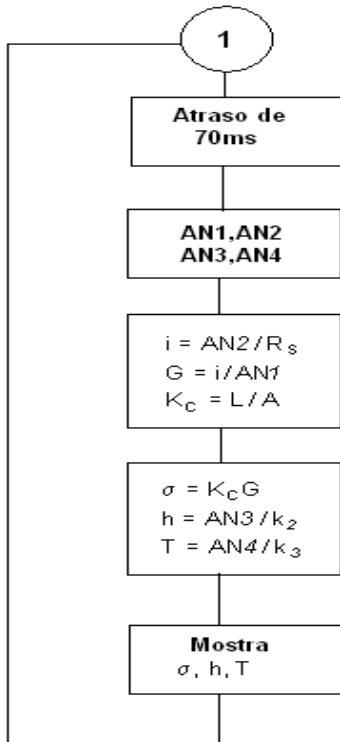


Figura 4 – Roteiro para obter a condutividade e o nível da água

3.0 RESULTADOS

A análise dos resultados será dividida em três partes, análise dos resultados da condutividade elétrica, do nível de água, e a descrição do equipamento.

3.1 Condutividade elétrica

O modelo para a propagação do sinal senoidal no meio condutor prevê que o potencial elétrico varie linearmente em função da distância, conforme a equação (6), desde que $\alpha x \ll 1$. E através do potencial elétrico podemos obter a condutividade pela equação (3). Para verificar a validade desse modelo utilizou-se água mineral de condutividade conhecida de valor $0,206 \times 10^{-1} \text{ S/m}$, na temperatura de 25°C . A frequência angular, ω , é igual a $6,28 \times 10^3 \text{ rad/s}$ e a permeabilidade magnética, μ , $1,2 \times 10^{-6} \text{ H/m}$, para o meio condutor. Para os valores de x entre 0 a 30cm, verifica-se que a condição $\alpha x \ll 1$ é válida. Portanto, obteve teoricamente os valores do potencial elétrico em função da distância e comparou-os com os valores experimentais, conforme a Figura 5. Os valores experimentais foram obtidos colocando-se eletrodos entre os terminais do sensor e medindo-se a tensão de pico. A temperatura foi monitorada e manteve-se igual a $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Calculou-se o desvio padrão, sendo igual a 0,144, cujo valor aponta para a validade do modelo.

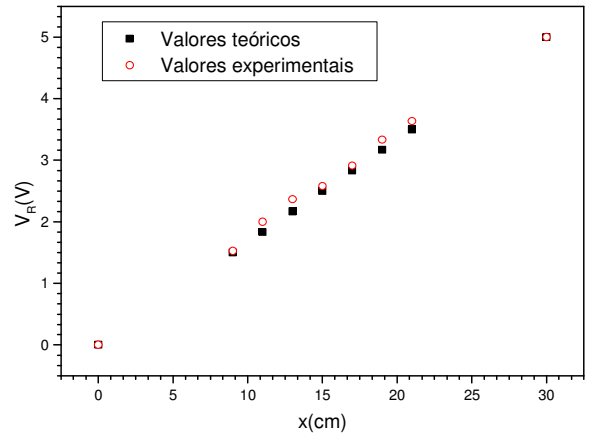


Figura 5 – Comparação entre valores medidos e experimentais.

3.2 Nível de água

O nível de água é obtido através do valor da tensão no resistor R. De acordo com a equação (11), existe uma relação linear entre o valor de V_R e o nível de água, h . A Figura 6 mostra a variação de V_R em função do nível. Pode-se constatar que essa relação não é linear, e através de ajuste polinomial do segundo grau tem-se:

$$V_R = 0,32343 + 0,1907 h - 0,00433 h^2 \quad (13).$$

Onde V_R é dado em volts e h em centímetros, e $R^2 = 0,99481$.

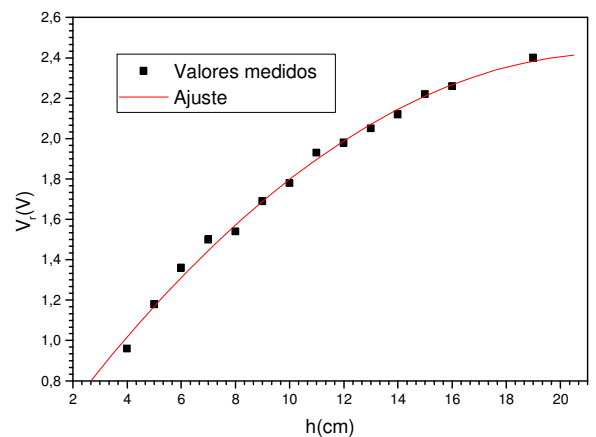


Figura 6 – Tensão no resistor R em função do nível de água.

Para exibir o valor do nível de água no sistema, utilizou-se de recurso semelhante ao ajuste do gráfico da Figura 6, sendo que o parâmetro independente foi V_R . O ajuste por *software* mostrou bons resultados e precisão, visto que o valor do nível pode ser aferido de forma visual no próprio sensor.

3.3 O equipamento

O equipamento desenvolvido é o mostrado na Figura 7. Os dados adquiridos, em cada aquisição, são mostrados no LCD, sendo eles a condutividade elétrica, o nível de água e a temperatura. Nesta primeira fase não foi implementada a entrada de dados via teclado. No entanto, no futuro será possível configurar o intervalo de aquisição, calibração do sistema, entre outras opções.

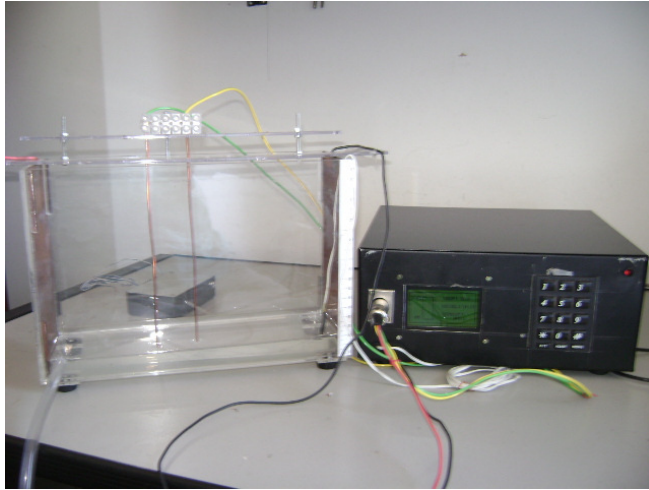


Figura 7– O equipamento e o sensor.

4. CONCLUSÃO

Apresentou-se neste artigo o desenvolvimento de um sensor para medir simultaneamente a condutividade e o nível de água. Testes preliminares mostram a viabilidade da medição da condutividade com boa precisão. Após o término da primeira etapa do desenvolvimento do equipamento, serão realizadas novas medidas de condutividade e compará-las com outros equipamentos e métodos. Já na medição do nível de água, constatou-se a falta de linearidade entre aquele parâmetro e o valor da tensão V_R . Apesar de não constituir um empecilho, visto que foi realizado o ajuste por *software*, estudos futuros apontam para a necessidade de analisar as causas e se possível evitá-las. Após constatar a validade do método, outras formas de sensor serão estudadas, principalmente aquelas que permitam análise de fluxo contínuo de água.

REFERÊNCIAS

- [1] G. W. Ewing,, *Métodos Instrumentais de Análise Química*. Vol 1, Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 1972.
- [2] P. Ramos, J.M. Dias, H.M. Geirinhas, A.L.Ribeiro, "A four terminal water-quality-monitoring conductivity sensor", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 3, pp. 577-583, March 2008.
- [3] Balbinot,A; Brusamarello, V.J. Instrumentação e Fundamentos de medidas. LTC. Editora, Rio de Janeiro, 2007.
- [4] A. Ribeiro, D. Medeiros, "Sistema de monitoramento do nível de água utilizando sensor capacitivo", XVIII Congresso Brasileiro de Automática, pp 2425-2428, Bonito-MS, Setembro 2010.
- [5] J.Kraus, K.Carver, *Eletromagnetics*, McGraw-Hill, New York, 1973.