

DESENVOLVIMENTO DE SENSOR CAPACITIVO PARA MEDIÇÃO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS

IGOR S. DE MELO¹, ANGELO T. AZEVEDO², THAYSSA R. Q. LIMA¹,
MARINALDO F. PINTO³, CONAN A. SALVADOR³

¹ Graduando (a) em Engenharia Agrícola e Ambiental, Depto. de Engenharia, Instituto de Tecnologia, UFRRJ, Seropédica-RJ, Fone: (0XX21) 3404-8033. E-mail: isd.melo96@gmail.com

² Eng^o Agrícola e Ambiental, Mestrando, Depto. Engenharia de Biosistemas, ESALQ/USP, Piracicaba – SP.

³ Eng^o Agrícola, Professor Adjunto, Depto. de Engenharia, IT/UFRRJ, Seropédica-RJ.

Apresentado no
XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2019
17 a 19 de setembro de 2019 - Campinas - SP, Brasil

RESUMO: A medição e o monitoramento da chuva são fundamentais para basear projetos que envolvam o uso e o controle de recursos hídricos. Os pluviógrafos com princípio de medição basculante são majoritariamente empregados, porém incertezas na medição desses equipamentos tem estimulado a busca por sensores robustos e que permitam registros contínuos, como sensores capacitivos. O objetivo do trabalho foi desenvolver um sensor capacitivo a ser inserido no reservatório de armazenamento do pluviógrafo, que permita a mensuração contínua e automática dos dados. Confeccionou-se reservatórios de PVC, com diâmetro interno de 20 mm, 20 cm de comprimento e cap na extremidade basal, para cada modelo de sensor capacitivo desenvolvido. Foram construídos 5 modelos de sensores capacitivos, os quais foram comparados mediante a amplitude da capacitância gerada, com introdução de volumes conhecidos nos reservatórios, sendo realizada 3 repetições por sensor. O sensor selecionado foi calibrado obtendo-se a equação de ajuste por regressão. Os resultados obtidos comprovaram que o sensor desenvolvido tem amplitude de capacitância adequada e potencial para uso na instrumentação de pluviógrafos de medição automática.

PALAVRAS-CHAVE: instrumentação, precipitação pluvial, dielétrico.

CAPACITIVE SENSOR DEVELOPMENT FOR MEASUREMENT FOR PLUVIOMETRIC DATA

ABSTRACT: Measuring and monitoring rainfall is critical to basing projects involving the use and control of water resources. However, uncertainties in the measurement of this equipment have stimulated the search for robust sensors and that allow continuous records, such as capacitive sensors. The objective of the work was to develop a capacitive sensor to be inserted in the storage tank of the pluviograph, which allows the continuous and automatic measurement of the data. PVC reservoirs, with internal diameter of 20 mm, 20 cm in length and cap at the basal end were made for each model of capacitive sensor developed. Five capacitive sensor models were constructed, which were compared by means of the amplitude of the generated capacitance, with the introduction of known volumes in the reservoirs, with 3 repetitions per sensor. The selected sensor was calibrated to obtain the regression adjustment

equation. The obtained results proved that the developed sensor has adequate capacitance amplitude and potential for use in the instrumentation of automatic measurement pluviograph.

KEYWORDS: instrumentation, rainfall, dielectric.

INTRODUÇÃO

A chuva é o fenômeno alimentador da fase terrestre do ciclo hidrológico, sendo imprescindível sua caracterização física por meio das variáveis altura pluviométrica, duração e intensidade do evento. O conhecimento da disponibilidade e das características das chuvas que ocorrem em uma região é fator determinante para os projetos e pesquisas que envolvam o uso e o controle de recursos hídricos, abrangendo as áreas de dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação e drenagem, perdas de solo e fertilizantes por erosão hídrica, previsão de inundações e estabilidade de encostas, lixiviação de substâncias químicas, infiltração, balanço hídrico, época de plantio e culturas adequadas (CARVALHO et al., 2010; GERVÁSIO et al., 2007; MANSANO et al., 2015).

O Brasil, por ser um país de clima tropical, é importante o estudo das chuvas intensas curtas (de 10 min a 24 h de duração). Com isso, a estação hidrometeorológica deve possuir pluviógrafo, sendo o princípio de medição por cubas basculante convencional o mais empregado (BLAINSKI et al., 2012; SENTELHAS & CARAMORI, 2002).

Todavia, pesquisas realizadas alertam quanto a confiabilidade dos dados obtidos por esse tipo de equipamento, visto a elevada incerteza observada em chuvas de pequena intensidade, bem como a tendência a subestimar medidas quando da ocorrência de chuvas mais intensas (BRAGA E FERNANDES, 2007; LA BARBERA et al., 2002). Salienta-se que a incerteza observada gera impactos negativos na eficiência e eficácia de projetos, bem como os resultados de pesquisas podem ser comprometidos. De acordo com TANNER (1990), incertezas acima de 10% pode ocorrer com frequência, em especial nos sensores basculantes de maior resolução.

Nessa perspectiva, uma alternativa mitigadora seria a aplicação da eletrônica e da automação no desenvolvimento de sensores mais robustos, de custo acessível, e que permita a obtenção das medidas com incerteza aceitável. GERVÁSIO et al. (2007) relatam que sensores que tenham um princípio de medição que permitam o registro contínuo e que possua dispositivo de sifonagem podem fornecer medidas mais exatas e desempenho satisfatório. CARNEIRO et al. (1997) recomendam o uso de sensor capacitivo de nível para construção de pluviômetros e outros equipamentos de medidas automatizadas de variáveis hidrológicas.

Portanto, este trabalho teve o objetivo de desenvolver um sensor capacitivo a ser inserido no reservatório de armazenamento de pluviógrafo, utilizando materiais facilmente disponíveis no mercado, capaz de permitir a mensuração contínua de características físicas de eventos de chuva e posterior automação.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Automação e Controle de Sistemas Agrícolas, situado no Departamento de Engenharia do Instituto de Tecnologia, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), campus Seropédica-RJ.

Inicialmente, elaborou-se diferentes composições estruturais do sensor capacitivo, de modo que materiais metálicos devidamente isolados funcionassem como placas do capacitor, o material isolante como dielétrico, cuja capacitância é variável com o nível de água. Foram

construídos um reservatório para cada sensor desenvolvido, sendo composto por tubo de PVC com 20 mm de diâmetro interno e 20 cm de comprimento, extremidade inferior foi acoplado um cap. A escolha dos materiais utilizados considerou a aquisição facilitada e o baixo custo.

Construiu-se cinco modelos distintos de sensor capacitivo: o modelo 1, era composto de um fio de cobre esmaltado (23 AWG) com uma das extremidades isoladas, esticado e enrolado entre dois cilindros de borracha fixos nas extremidades de um tubo cilíndrico de alumínio de diâmetro externo similar ao diâmetro interno do reservatório, que contava com três voltas do fio, espaçadas cerca de 0,5 cm cada; o modelo 2, foi construído com duas placas planas de fenolite contendo cobre em um das faces, com 1,5 cm de largura, isoladas com resina epóxi, instaladas paralelamente com espaçamento de 0,8 cm entre as faces cobreadas, e fixadas com resina no cap; o modelo 3, teve inspiração similar ao anterior, contudo foi construído com uma placa plana de fibra de vidro com dupla face de cobre, com 1,5 cm de largura, sendo as faces interconectadas por um fio de cobre soldado com estanho e isoladas com resina epóxi, a haste foi fixada com resina no centro do cap e a parede interna do reservatório foi coberta por uma chapa de alumínio, formando um tubo cilíndrico; no modelo 4, a sonda sensora foi confeccionada com uma haste central de aço inoxidável com diâmetro de 0,6 cm e 20 cm de comprimento, sendo fixado em suas extremidades um disco plástico com 1,3 cm de diâmetro e 1 mm de espessura, contendo em cada disco 4 orifícios diametralmente opostos em que se perpassou um fio de cobre esmaltado (23 AWG), formando uma espécie de gaiola; por fim, o modelo 5 foi inspirado na sonda sensora de teor de água no solo pelo método de reflectometria no domínio do tempo, continha duas hastes de aço inoxidável similar ao modelo anterior, isoladas com aplicação de resina epóxi em sua superfície, fixadas com a aplicação da mesma resina no cap, e com 1 cm de distância entre elas.

Para verificar a capacitância gerada em cada modelo, foi inserido volumes conhecidos de água filtrada da rede de abastecimento, variando de 10 a 60 mL, com intervalos de 10 mL, sendo realizado 3 repetições em cada sensor. Um multímetro digital (Minipa, modelo ET-1659) com função de leitura da capacitância foi utilizado nessa etapa. Após a conclusão dessa etapa verificou-se que o modelo 1 apesentou maior sensibilidade de leitura, sendo o modelo selecionado. Na Figura 1 verifica-se a composição estrutural do sensor capacitivo selecionado.

Nesse caso, os fios de cobre e o tubo de alumínio funcionam como placas e o revestimento esmaltado como dielétrico do capacitor, de tal modo que a capacitância depende da carga hidráulica no reservatório de medição, conforme a Equação 1 apresentada por Carneiro et al. (1997). Segundo o princípio capacitivo, conforme o reservatório que contém o sensor é abastecido com a água proveniente da precipitação pluvial, seu dielétrico sofre uma variação quantitativa, com elevação da capacitância, uma vez que a constante dielétrica da água é notadamente superior ao do ar atmosférico.

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

em que,

C - capacitância, pF;

k₀ - constante dielétrica do vácuo (8,858 x 10⁻² pF cm⁻¹);

k - constante dielétrica do esmalte em relação à do vácuo, pF cm⁻¹;

d - nível de água a partir da extremidade do fio, cm;

r - raio do fio de cobre, cm; e,

e - espessura do esmalte, cm.

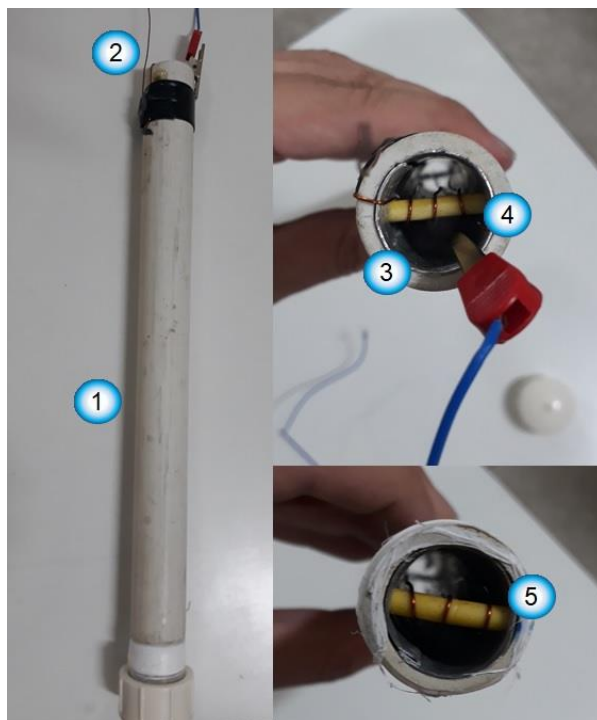


FIGURA 1. Detalhe da composição estrutural do sensor capacitivo proposto, no interior do reservatório de medição: 1. reservatório de medição e cap, em PVC; 2. terminais para obtenção do sinal de resposta do sensor; 3. tubo cilíndrico de alumínio; 4. cilindro plástico de suporte do fio esmaltado (vista superior do reservatório); e, 5. cilindro plástico de suporte do fio esmaltado (vista inferior do reservatório).

Posteriormente, realizou-se ajustes na confecção do reservatório de armazenamento de água e no sensor capacitivo: a) ampliou-se o diâmetro interno do reservatório para 25 mm e o comprimento para 30 cm; b) o número de voltas do fio de cobre esmaltado passou para 4, seguindo o mesmo espaçamento entre fios do modelo 1, porém os cilindros de borracha que servem de suporte para os fios passaram a ter um espaçamento de 29 cm; c) inseriu-se um tubo plástico de 0,8 cm de diâmetro interno no interior do reservatório, o qual foi conectado a um funil plástico de 75 mL na sua extremidade superior, com a função de servir como poço tranquilizador à entrada de água; e, d) inseriu-se através do cap da extremidade inferior do reservatório um tubo de polietileno de alta densidade, com 0,4 cm de diâmetro interno, formando um sifão, com função de realizar a drenagem do reservatório. Salienta-se que a inserção do tubo com a função de minimizar a instabilidade da superfície líquida com a velocidade de impacto de gotas d'água, quando da entrada de água, deve-se a uma possível variação no sinal de resposta do sensor.

Em seguida, realizou-se a etapa de calibração do sensor capacitivo, na qual inseriu-se volumes crescentes de água. A resposta analógica do sensor foi avaliada na faixa de 0 a 105 mL, com a adição de 5 mL entre leituras, sendo realizado 10 repetições. Para obtenção da equação de calibração realizou-se a regressão linear, observando o modelo de melhor ajuste aos dados medidos nos ensaios.

Para isso, o sensor desenvolvido foi conectado a um microcontrolador Arduino Nano versão 3.0, responsável principalmente pela aquisição e processamento do sinal digital, por uma porta de 5V e uma porta analógica de dreno, onde a capacitância é o valor obtido após o capacitor armazenar 63% da energia máxima que o mesmo suporta. Sendo assim, a medida de volume se torna proporcional a medida de capacitância. Optou-se por montar o circuito

eletrônico utilizando o microcontrolador Arduino por ser uma plataforma de hardware de código fonte aberta com comunicação serial, USB, de baixo custo, software livre e de operação facilitada (KAMOGAWA & MIRANDA, 2013). O software para a programação do Arduino é escrito em linguagem C++, disponibilizado no site do desenvolvedor, o qual também foi utilizado para realizar a aquisição das leituras.

Com o intuito de avaliar a estabilidade do sinal de resposta do sensor capacitivo proposto, com leitura contínua e com leitura discreta, realizou-se ensaios em laboratório. O ensaio de leitura contínua foi conduzido simulando-se diferentes intensidades de precipitação (23,2; 44,1; e, 234,5 mm h⁻¹), considerando-se uma área de coleta do futuro pluviógrafo de 268,6 cm². Nesse caso, o ensaio baseou-se na metodologia proposta por Braga e Fernandes (2007), onde sucintamente, utilizou-se uma bureta de 100 mL, preenchida com água filtrada, fixada por um suporte e cuja carga hidráulica foi mantida constante com o uso do frasco de Mariotte. Então, iniciou-se o gotejamento da água, sendo realizado 3 repetições por ensaio. Por outro lado, o ensaio de leitura discreta foi conduzido com a adições em intervalos de 10 mL de água ao reservatório contendo o sensor, com aquisição do sinal de resposta por 30 s. Avaliou-se nesse último o sinal de resposta para uma a variação de 10 a 80 mL, sendo realizada 3 repetições.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Buscando-se obter o modelo de sensor capacitivo que promovesse a maior amplitude de capacitância com o incremento de volume de água no reservatório de armazenamento realizou-se a verificação da faixa de medição dos modelos de sensores propostos (Figura 2).

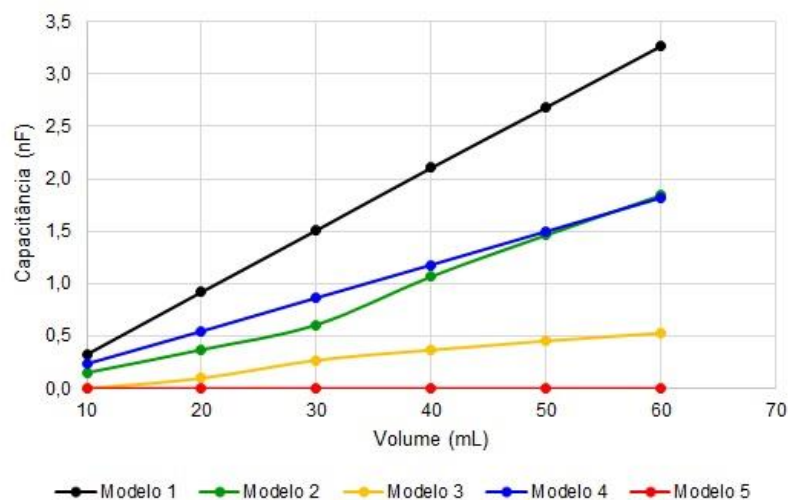


FIGURA 2. Sinal de resposta do sensor capacitivo (nF) gerado pela variação do volume de água (mL) no interior do reservatório, para diferentes modelos estruturais.

Verifica-se na Figura 2 que o modelo 1 proporcionou maior capacitância para todos os volumes armazenados. Tal resultado justifica-se por existir 6 fios de cobre esmaltado esticados (compondo as 3 voltas) em contato com a água, ampliando o tamanho do capacitor. Os fios, por serem capacitores cilíndricos tem área de contato com a água elevada, além de robustez mecânica, estabilidade e linearidade de sinal, menor susceptibilidade a ruídos de indutância magnética e apresentar facilidade de obtenção e construção (CANAFISTULA, 2013). Os modelos 2, 3 e 4 tiveram desempenho satisfatório, contudo o modelo 5,

provavelmente devido a espessura excessiva do dielétrico, não possibilitou a obtenção de resultados detectáveis pelo aparelho de medição. Rêgo Segundo (2010), desenvolvendo um sensor de teor de água no solo, confeccionou um sensor capacitivo utilizando hastes de aço inoxidável revestida com verniz isolante e por massa epóxi, sendo que o último revestimento testado não apresentou resultado satisfatório, ressaltando a importância do dielétrico no desempenho do sensor.

Salienta-se ainda, que a não linearidade observada do modelo 2, deve-se a existência de imperfeição no dielétrico da placa plana de cobre, na altura correspondente ao volume de 30 mL. Já o modelo 3 se mostrou o de maior dificuldade construtiva e baixos valores de capacitância. Pode-se constatar que a substituição da resina epóxi, utilizada como material isolante, por um verniz líquido pode contribuir para obtenção de um dielétrico com maior uniformidade na espessura.

Na Figura 3, observa-se a variação do volume no reservatório em função da capacitância mensurada pelo sensor do modelo selecionado.

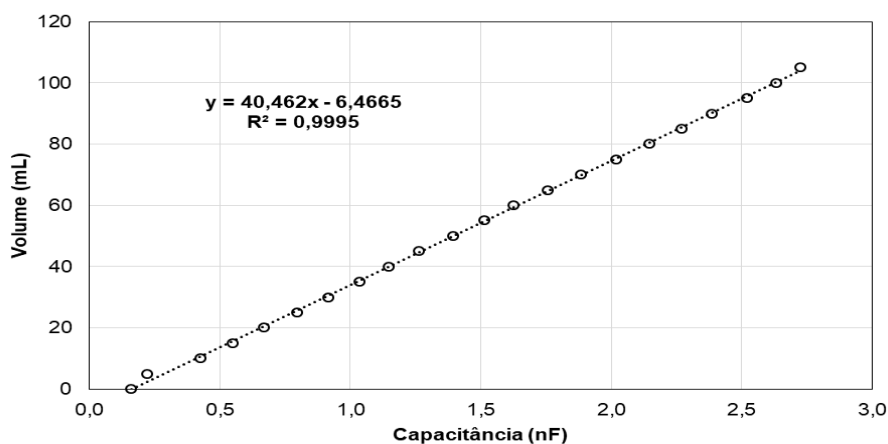


FIGURA 3. Resposta do sensor capacitivo a variação do volume de água no reservatório de medição.

Percebe-se que conforme a teoria, o modelo linear descreve a resposta do sensor à variação do volume, possibilitando a obtenção de um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9995, e desse modo apenas 0,05% da variância não é explicada pelo modelo de regressão. Ressalta-se que cada ponto do gráfico representava o valor médio de 10 repetições, cada qual obtida de um valor médio de 100 leituras. Analisando-se os dados constatou-se uma variabilidade maior dos dados à medida que aumenta-se a carga hidráulica no reservatório de medição, sendo obtido desvios padrão de 18,79 pF (5 mL) até 82,19 pF (95 mL). Quando o reservatório estava vazio (0 mL) o desvio padrão observado foi de 31,30 pF e, por ter capacitância média baixa, obteve-se coeficiente de variação de 19,71%. Tal resultado indica que para uso desse sensor deve-se manter uma lâmina ≥ 5 mL no interior reservatório de medição. A linearidade na resposta também foi observada por CARNEIRO (1997) ao propor um sensor capacitivo para medição de nível de água.

Salienta-se que a maior variabilidade obtida para volumes próximos a capacidade do reservatório pode ter sido ocasionado pela proximidade entre a lâmina d'água no interior do reservatório e o limite superior de fixação dos fios de cobre. Contudo, a variabilidade obtida foi considerada satisfatória para os fins propostos.

Nas Figuras 4 e 5 pode-se constatar a estabilidade do sinal de resposta do sensor capacitivo para medição contínua e discreta. Ressalta-se que, devido as repetições terem semelhança do sinal de resposta do sensor em cada ensaio, optou-se por apresentar apenas uma das repetições de cada ensaio. Tratando-se das leituras contínuas nota-se que em todas as

intensidades de precipitação ocorre um comportamento irregular nos primeiros instantes de ensaio, o qual pode ser explicado pelo fato da carga hidráulica não ser suficiente para atingir os fios do sensor de modo a interferir satisfatoriamente na capacitância. Tal resultado corrobora com a verificação supracitada de que uma lâmina de 5 mL deve ser mantida no interior do reservatório, possibilitando menor variabilidade e incertezas de medição.

Quando se analisa o sinal de resposta do sensor para a menor e a maior intensidade de precipitação verifica-se que o mesmo manteve comportamento linear. Contudo, para a intensidade de precipitação média de $44,1 \text{ mm h}^{-1}$ foi observado um comportamento sinuoso do sinal de resposta do sensor, o qual é evidenciado após certo valor de carga hidráulica ser atingida no reservatório de medição. Além disso, para essa mesma intensidade de precipitação percebe-se que a amplitude da sinuosidade aumenta na mesma proporção que amplia a carga hidráulica no interior do reservatório. Todavia, verificou-se que os valores de capacitância são crescentes, mesmo que em certos instantes a taxa de crescimento da capacitância fosse pequena. Vale salientar que esse estudo foi realizado após a inserção do tubo de estabilização no reservatório de medição, e que as leituras eram obtidas em intervalos de 1s.

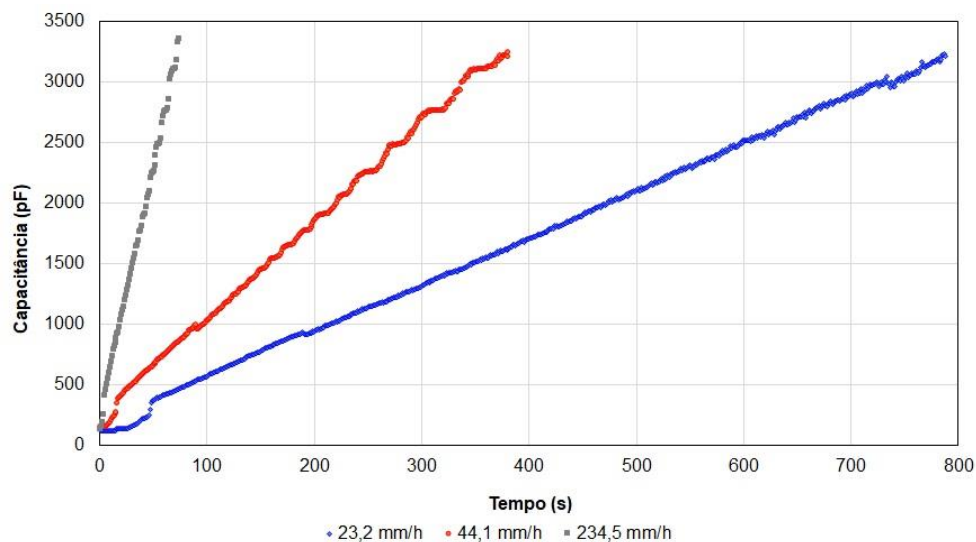


FIGURA 4. Estabilidade do sinal de resposta do sensor para leitura contínua, com variação do volume de água no reservatório de medição sob diferentes intensidades de precipitação.

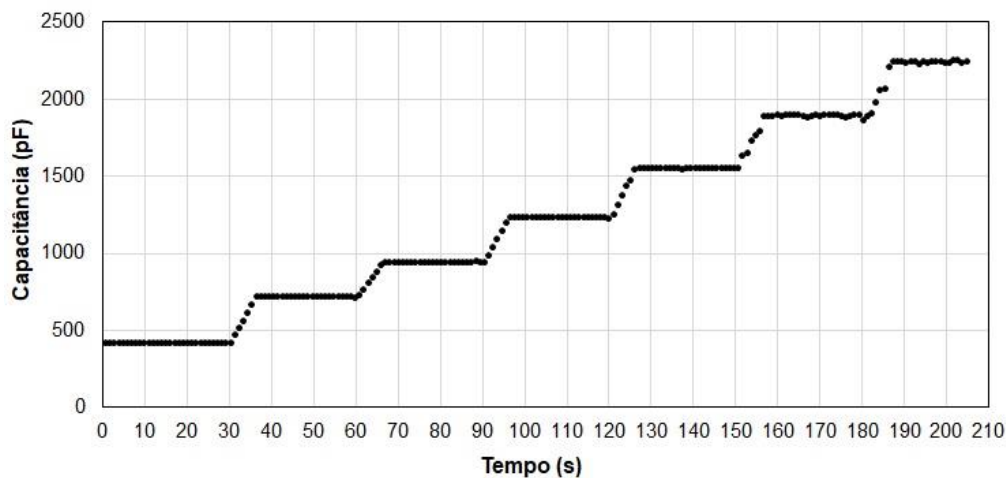


FIGURA 5. Estabilidade do sinal de resposta do sensor para leitura discreta, com variação do volume de água no reservatório de medição.

No tocante a estabilidade do sinal de resposta do sensor capacitivo para medição discreta (Figura 4), percebe-se que a capacitância equivalente a cada volume inserido no reservatório de medição (incrementos de 10 mL) manteve sinal de resposta estável. Como a aquisição da capacitância pelo microcontrolador foi contínua, mesmo no momento de adição de volume de água ao reservatório, observou-se que o incremento do volume conferiu um tempo de estabilização da capacitância de 7 s. Da mesma forma que os ensaios anteriores, verifica-se que a medida que a carga hidráulica aumenta no interior do reservatório de medição aumenta-se também a variabilidade dos dados.

CONCLUSÕES

Pode-se concluir que sensor capacitivo composto por fios de cobre esmaltado e tubo cilíndrico de alumínio, proporcionou maior amplitude do sinal de capacitância gerado com a variação da carga hidráulica no reservatório de medição, e que a variabilidade e estabilidade de aquisição do sinal de resposta do sensor mostrou-se aceitável para o fim proposto. Com isso, pode-se afirmar que o modelo escolhido tem potencial para uso na instrumentação de pluviógrafos de medição automática.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a UFRRJ, pela concessão da bolsa de iniciação científica e pela estrutura cedida para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BLAINSKI, E.; GARBOSA, L.H.P.; ANTUNES, E.N. **Estações hidrometeorológicas automáticas: recomendações técnicas para instalação**. Florianópolis: EPAGRI, 2012, 43p. (EPAGRI. Documentos, 240).
- BRAGA, S.M.; FERNANDES, C.V.S. Performance de sensores de precipitação do tipo “tipping bucket” (báscula) – um alerta para a ocorrência de erros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.12, n.1, p.197-204, 2007.
- CANAFISTULA, F.J.F. **Desenvolvimento, implementação e avaliação de uma estação agrometeorológica automática e sensores ambientais**. 2013. 138p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- CARNEIRO, C.J.G.; LIRA, C.A.B.O.; MENDES SOBRINHO, J.A.; ANTONINO, A.C.D.; MELLO, F.L.V. Sensor capacitivo para medição do nível de água. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.32, n.6, p.617-620, 1997.
- GERVÁSIO, E.S.; SOCCOL, O.J.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A. Construção de um pluviógrafo automático. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, v.2, n.2, p.13-18, 2007.
- KAMOGAWA, M.Y.; MIRANDA, J.C. Uso de hardware de código fonte aberto “arduino” para acionamento de dispositivo solenoide em sistemas de análises em fluxo. **Química Nova**, v.36, n.8, p.1232–1235, 2013.
- LA BARBERA, P.; LANZA, L.G.; STAGI, L. Tipping bucket mechanical erros and the influence on rainfall statistics and extremes. **Water Science and Technology**, v.45, n.2, p.1-10, 2002.

MANSANO, M.V.; CRIVELARI, R.M.; REDA, A.L.L.; DURO, M.A.S. Calibração de pluviômetros de balança: metodologia para análise e correção de dados de campo. In: Safety, Health and Environment World Congress, XV, 2015, Portugal, **Anais eletrônicos...** Portugal: COPEC, 2015. Disponível em: <<http://copec.eu/congresses/shewc2015/proc/works/31.pdf>>. Acessado em: 09 de abr. 2018.

SEGUNDO RÊGO, A.K. **Desenvolvimento de sensor de teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para uso em irrigação**. 2010. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.

SENTELHAS, P.C.; CARAMORI, P.H. Inconsistências na medida da chuva com pluviômetros de balança, utilizados em estações meteorológicas automáticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.2, p.301-304, 2002.

TANNER, B.D. Automated weather station. **Remote Sensing Reviews**, Abingdon, v.5, n.1, p.73-98, 1990.