

VALIDAÇÃO DE UM SENSOR CAPACITIVO CILÍNDRICO PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE EM GRÃOS DE ARROZ
GABRIEL RODRIGUES¹; ALAN JUNIO DA SILVA BORELA²; FELIPE BONDEZAM DA SILVA TOLEDO³; RAFAEL SCHMECHEL SELL⁴; RICARDO SCHERER POHNDORF⁵; ÁDAMO DE SOUSA ARAÚJO⁶

1 UFPEl – gabriel.rd@icloud.com

2 UFPEl alanj.borela@gmail.co

3UFPEl – felipebt338@gmail.com

4UFPEl – rafael.sell@outlook.com

5UFPEl – ricardoscherer.eng@gmail.com

6UFPEl – adamo.araujo@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

A determinação precisa e rápida do teor de água em grãos e sementes é um parâmetro crítico para garantir a qualidade, otimizar o processamento e assegurar condições seguras de armazenamento. Métodos tradicionais, como a secagem em estufa, embora considerados padrão pela precisão, são destrutivos, demandam tempo considerável e são incompatíveis com a necessidade de monitoramento em tempo real da agroindústria 4.0. Diante desse desafio, técnicas não destrutivas baseadas na medição das propriedades dielétricas do material emergem como uma alternativa eficiente.

O princípio físico que fundamenta essa técnica é a disparidade acentuada entre a permissividade dielétrica relativa (constante dielétrica) da água ($\epsilon_r \approx 80$) e a da matéria seca dos grãos (ϵ_r entre 2 e 5). Essa diferença de ordens de magnitude torna a permissividade efetiva do grão sensível às variações em seu teor de umidade, conforme estabelecido por Berbert et al. (2004).

Um sensor capacitivo opera medindo a capacitância de um sistema, a qual é diretamente proporcional à permissividade dielétrica do material inserido entre os eletrodos. Dessa forma, as flutuações na capacitância constituem um indicador robusto e quantitativo do conteúdo de água. Um estudo prévio de iniciação científica validou o modelo teórico fundamental para um capacitor de placas paralelas, dado por $C = \frac{\epsilon_0 * \epsilon_r * A}{d}$ (RODRIGUES, 2025). No entanto, essa configuração sofre de uma limitação prática significativa: o efeito de borda, fenômeno no qual as linhas de campo elétrico se espalham além da área entre as placas, tornando a medição sensível à distribuição do material e a interferências externas (NELSON, 2015).

Para contornar essa vulnerabilidade, sensores dielétricos aplicados à agricultura frequentemente adotam uma geometria de cilindros coaxiais. Neste arranjo, o campo elétrico é confinado no volume anular entre o condutor interno e o externo, minimizando drasticamente o efeito de borda e propiciando medições notavelmente mais robustas, estáveis e reproduzíveis.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo validar o desempenho de um sensor capacitivo de geometria cilíndrica coaxial para a medição do teor de umidade em grãos de arroz. Adicionalmente, o estudo busca investigar e quantificar a influência da temperatura do ar nas leituras de capacitância, um fator ambiental crucial para a aplicação prática desta tecnologia em condições reais.

2. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Instrumentação Agrícola e de Engenharia de Pós-Colheita do curso de Engenharia Agrícola, vinculados ao Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

O estudo teve como base um conjunto de dados experimentais obtido a partir de um planejamento fatorial completo, no qual se avaliou o comportamento de um sensor capacitivo cilíndrico sob a influência de três variáveis controladas: umidade dos grãos, temperatura do ar e frequência de excitação.

Os níveis considerados para cada variável foram:

- Umidade (U.b.u): 4 níveis (14,2%, 16,1%, 19,2% e 22,6%);
- Temperatura ambiente (T): 3 níveis (10 °C, 20 °C e 40 °C);
- Frequência do medidor LCR: 3 níveis (1 kHz, 10 kHz e 100 kHz).

Para cada uma das 36 combinações experimentais foram realizadas três repetições, totalizando 108 observações. A variável de resposta considerada foi a capacitância (C, em pF), medida por meio de um medidor LCR.

O teor de umidade dos grãos foi determinado pelo método padrão de estufa (U.b.u.). A análise dos dados foi conduzida no software Excel, empregando modelagem por regressão linear.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em conformidade com a teoria estabelecida, os dados confirmaram uma correlação positiva e aproximadamente linear entre a capacitância e o teor de umidade para todas as condições testadas. A sensibilidade do sensor ($\Delta C/\Delta U$), no entanto, demonstrou uma dependência significativa em relação à frequência do sinal elétrico e à temperatura ambiente.

Um exemplo marcante dessa dependência ocorreu a 10 °C: um aumento na umidade de 14,2% para 22,6% resultou em um incremento médio de capacitância de aproximadamente 349 pF a 1 kHz, contra uma variação de apenas 51 pF na frequência de 100 kHz. Essa drástica redução na sensibilidade com o aumento da frequência está diretamente associada ao fenômeno de dispersão dielétrica.

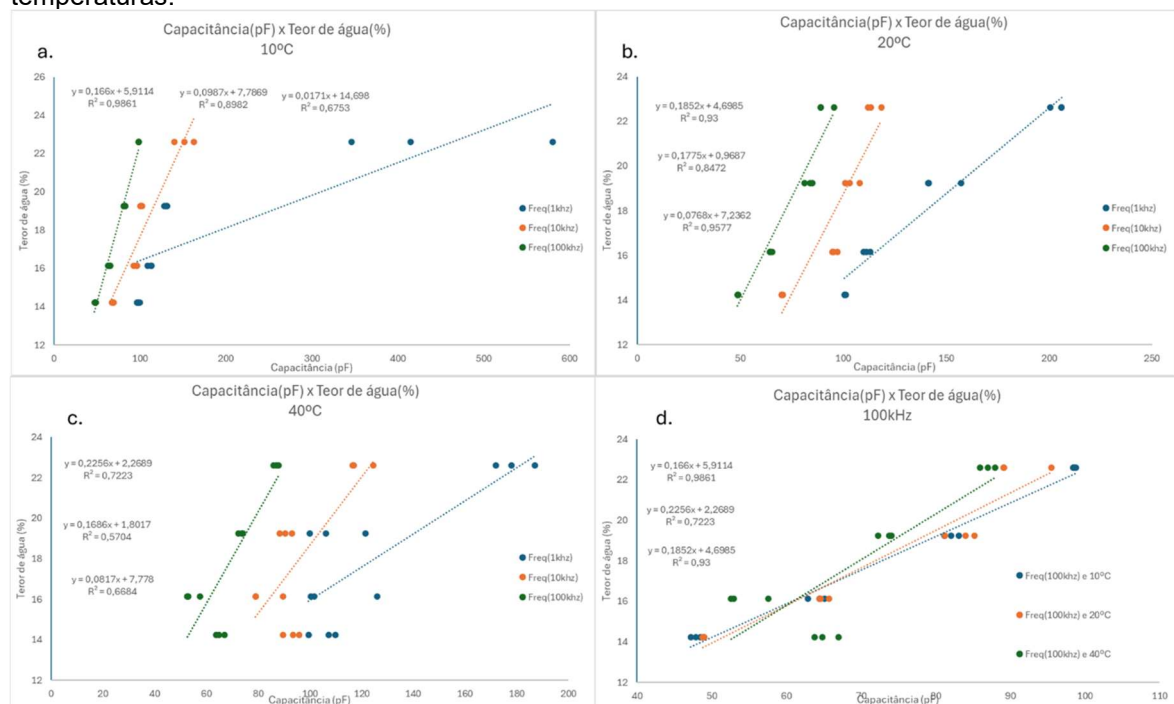
Conforme observado por Sacilik e Colak (2010), em baixas frequências, mecanismos de polarização mais lentos – como a polarização interfacial (de Maxwell-Wagner-Sillars) e a polarização dipolar – conseguem se alinhar com o campo elétrico alternado, contribuindo para uma alta permissividade efetiva e, consequentemente, para elevados valores de capacitância. À medida que a frequência aumenta, esses mecanismos tornam-se incapazes de acompanhar a oscilação rápida do campo, resultando em um declínio progressivo da permissividade e da capacitância medida.

Paradoxalmente, embora os valores absolutos de capacitância sejam menores em frequências mais altas, a qualidade do ajuste linear (quantificada pelo coeficiente de determinação, R^2) apresentou uma tendência de melhoria. Esse comportamento, visualizado nas Figuras 1a, 1b e 1c, sugere que operar em faixas de frequência elevadas contribui para a atenuação de ruídos e interferências, conferindo maior consistência e confiabilidade à resposta do sensor. Este resultado converge com os achados de Araújo, Monteiro, Gadotti e Farias (2025), que relataram ganhos significativos na qualidade do ajuste estatístico em sensores capacitivos para produtos agrícolas quando utilizando frequências mais altas. Essa sinergia de evidências reforça a robustez da abordagem e valida seu potencial de aplicação.

A influência da temperatura revelou-se complexa, sendo resultante da sobreposição de múltiplos fenômenos físicos antagônicos. Por um lado, o aumento da temperatura intensifica a agitação térmica molecular, que se opõe ao alinhamento ordenado dos dipolos de água com o campo elétrico, um efeito que tenderia a reduzir a capacitância. Por outro lado, a maior energia térmica eleva a mobilidade de íons dissolvidos no material, aumentando sua condutividade elétrica. Este segundo efeito influencia predominantemente as medições em baixas frequências, onde contribui para perdas por condução e pode mascarar a resposta capacitiva pura.

A análise da frequência fixa em 100 kHz (Figura 1d) permitiu isolar melhor o efeito da temperatura. Nota-se que o coeficiente angular das retas de regressão (que representa a sensibilidade $\Delta C/\Delta U$) aumenta com a elevação da temperatura. Isso indica que, nessa alta frequência, o efeito dominante do aumento da mobilidade iônica (que potencialmente facilita o acúmulo de carga nas interfaces, intensificando a polarização interfacial) pode ter superado o efeito de desalinhamento dipolar pela agitação térmica. Ademais, a maior consistência do ajuste linear a 10 °C sugere que esta condição específica minimiza interferências térmicas, apontando para uma possível janela operacional ideal para o sensor em ambientes com controle de temperatura.

Figura 1 – Regressão Linear da capacitância com a umidade dos grãos em diferentes temperaturas.



4. CONCLUSÕES

Em conclusão, este estudo demonstra que a relação entre capacitância e umidade é linear, porém profundamente influenciada pela frequência de operação e pela temperatura. Os resultados confirmam que altas frequências (como 100 kHz) proporcionam medições mais robustas, consistentes e com melhor ajuste linear, em comparação com as baixas frequências. A temperatura atua como um

modulador crítico dessa relação, com a condição de 10 °C mostrando-se particularmente estável para a medição.

Portanto, para aplicações práticas que demandam confiabilidade, precisão e robustez – como no monitoramento de produtos agrícolas em condições variáveis –, a operação em altas frequências é fortemente recomendada. Essa escolha mitiga efeitos indesejáveis, como ruídos e interferências, e garante uma correlação mais confiável e reproduzível entre capacitância e teor de umidade, validando o uso deste sensor como uma ferramenta eficaz para análise em condições experimentais similares.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, Ádamo de Sousa; MONTEIRO, Rita de Cassia Mota; GADOTTI, Gizele Ingrid; FARIAS, Andriago Xavier. Desenvolvimento de um sensor capacitivo para massa específica de sementes de soja. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v. 18, n. 2, p. e15600, 2025.

BERBERT, P.A. et al. Avaliação de três modelos dielétricos derivados da função $[(\epsilon' - 1)/\epsilon'']$ na estimativa do teor de água de sementes de feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v. 8, n. 1, p.92-101, 14 fev. 2004.

NELSON, S. O. *Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications*. Athens: Academic Press, 2015. 292 p.

RODRIGUES, G. et al. VALIDAÇÃO DO MODELO TEÓRICO DE UM SENSOR CAPACITIVO DE PLACAS PARALELAS. In: XXXIII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10ª Semana Integrada UFPEL, 2024.

SACILIK, K; COLAK, A. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. *Powder Technology*, Ankara, p. 365-370, 2010.