

PREDIÇÃO DO TEOR DE ÁGUA EM ARROZ: UM MODELO DE REGRESSÃO BASEADO EM RESPOSTA CAPACITIVA E TEMPERATURA.

**Rodrigo da Costa Cardoso¹; Estevan Alcântara Huckembeck²; Alan Junio da Silva
Borela³; Ricardo Scherer Pohndorf⁴; Ádamo de Sousa Araújo⁵**

¹ Estudante de Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Pelotas. E-mail:

rodrigocc3006@gmail.com

^{2,3} Estudante de Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Pelotas.

^{4,5} Professor de Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Pelotas.

RESUMO

A determinação rápida do teor de umidade em grãos é essencial para garantir qualidade no processamento e armazenamento. Este trabalho avaliou o uso de um sensor capacitivo cilíndrico para estimar a umidade, considerando os efeitos da temperatura e da frequência de excitação. O experimento foi conduzido em delineamento fatorial completo, com quatro níveis de umidade (14,2% a 22,6% b.u.), três temperaturas (10, 20 e 40 °C) e três frequências (1, 10 e 100 kHz), totalizando 36 combinações e 108 observações. A variável analisada foi a capacitância (pF), medida em medidor LCR. Os resultados mostraram relação linear entre capacitância e teor de água em todas as condições, com melhor desempenho na frequência de 100 kHz, que apresentou coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,95. Já em 1 kHz, os ajustes foram inferiores, evidenciando menor sensibilidade. Observou-se ainda que temperaturas mais elevadas reduziram a estabilidade da resposta. Conclui-se que o sensor capacitivo é uma alternativa promissora para a estimativa não destrutiva da umidade de grãos, principalmente quando operado em frequências elevadas.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização de grãos e sementes envolve parâmetros físicos como densidade aparente, teor de umidade, temperatura e composição química, fundamentais para a qualidade e definição de condições adequadas de processamento e armazenamento. A obtenção dessas informações pode ser realizada de forma não invasiva, ágil e precisa por meio da análise da permissividade dielétrica. Com o avanço das indústrias automatizadas e a necessidade de monitoramento em tempo real, essa abordagem se apresenta como alternativa promissora para o controle eficiente dessas variáveis (Trabelsi; Kraszewski; Nelson, 1999).

Os métodos convencionais para determinação do teor de água, como o uso de estufas, demandam tempo excessivo, podendo chegar a 72 horas, o que limita sua aplicação a rotinas específicas em unidades de armazenamento e processamento (Berbert et al., 2004; Brasil, 2009). Nesse sentido, o uso de sensores dielétricos destaca-se pela rapidez e

representatividade, permitindo medições contínuas e redução de perdas durante colheita, secagem e armazenamento (Moritz et al., 2012; Moura, 2012).

Modelos dielétricos desenvolvidos para diferentes culturas, como arroz, feijão e sorgo, têm demonstrado resultados consistentes, indicando a viabilidade de ampliar sua aplicação a diversas espécies agrícolas. Essa abordagem pode reduzir custos operacionais, aumentar a precisão das análises e fornecer subsídios para processos automatizados (Soares; Berbert; Oliveira, 2010; Kroessin et al., 2020).

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a aplicação da permissividade dielétrica como método alternativo para a determinação do teor de água em grãos e sementes, destacando seu potencial no processamento e armazenamento agrícola.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado nos Laboratórios de Instrumentação Agrícola e de Engenharia de Pós-Colheita da UFPel, com infraestrutura para medições, controle ambiental e análise de dados. Adotou-se um delineamento fatorial completo, avaliando o desempenho de um sensor capacitivo cilíndrico em função de três variáveis: umidade dos grãos (14,2%, 16,1%, 19,2% e 22,6% b.u.), temperatura (10, 20 e 40 °C) e frequência de excitação (1, 10 e 100 kHz).

As combinações resultaram em 36 condições experimentais, com três repetições cada, totalizando 108 observações. A variável resposta foi a capacitância (pF), obtida diretamente no medidor LCR. O teor de umidade foi previamente calibrado pelo método-padrão em estufa (BRASIL, 2009). A análise dos dados foi realizada no Microsoft Excel, empregando regressão linear para avaliar tendências e efeitos das variáveis sobre a resposta do sensor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a relação entre a capacitância (pF) e o teor de água (%) em diferentes temperaturas (10, 20 e 40 °C) e frequências de excitação (1, 10 e 100 kHz). Observa-se que, em todas as condições analisadas, a resposta capacitiva apresentou comportamento linear em função do teor de água, confirmando a viabilidade do uso do sensor capacitivo para estimar a umidade de grãos. Entretanto, a intensidade da resposta e a qualidade do ajuste foram influenciadas tanto pela frequência quanto pela temperatura.

A análise dos coeficientes de determinação (R^2) evidencia que a frequência de **100 kHz** apresentou os melhores resultados em todas as temperaturas, alcançando $R^2 = 0,9936$ a 10 °C, 0,9573 a 20 °C e 0,8727 a 40 °C. Esses valores demonstram elevada precisão do modelo linear em prever o teor de água, sobretudo em condições de menor temperatura.

A frequência de **10 kHz** apresentou desempenho intermediário, com R^2 variando entre 0,8803 e 0,8245. Já a frequência de **1 kHz** resultou nos menores ajustes, especialmente a 20 °C ($R^2 = 0,4896$), indicando maior suscetibilidade a ruídos e menor sensibilidade à variação da umidade. Esses resultados corroboram estudos prévios que apontam que a operação em frequências mais elevadas favorece a detecção de mudanças na constante dielétrica

associada à água presente nas partículas (TRABELSI; NELSON, 2007). A comparação entre as diferentes temperaturas mostra que, a 10 °C, os ajustes foram mais consistentes, destacando-se a frequência de 100 kHz ($R^2 = 0,9936$). Em 20 °C, observou-se redução da qualidade do ajuste para 1 kHz, embora as frequências mais altas tenham mantido boa correlação. Já em 40 °C, os coeficientes de determinação foram inferiores para todas as frequências, sugerindo que temperaturas elevadas comprometem a estabilidade da resposta do sensor.

Esses resultados indicam que a temperatura afeta a resposta capacitiva, possivelmente em função do aumento da mobilidade molecular e da condutividade elétrica dos grãos, o que altera a constante dielétrica do material e reduz a linearidade da resposta (KANDALA; SUNDARAM; LAWRENCE, 2012). O gráfico comparativo (Figura 1d) mostra de forma clara que a frequência de **100 kHz** foi a mais eficiente em todas as temperaturas testadas, com curvas bem definidas e maior precisão para estimar o teor de água. Observa-se ainda que, para um mesmo teor de água, os valores de capacitância tendem a ser maiores em temperaturas mais baixas, evidenciando o efeito combinado da temperatura e da frequência sobre a resposta dielétrica.

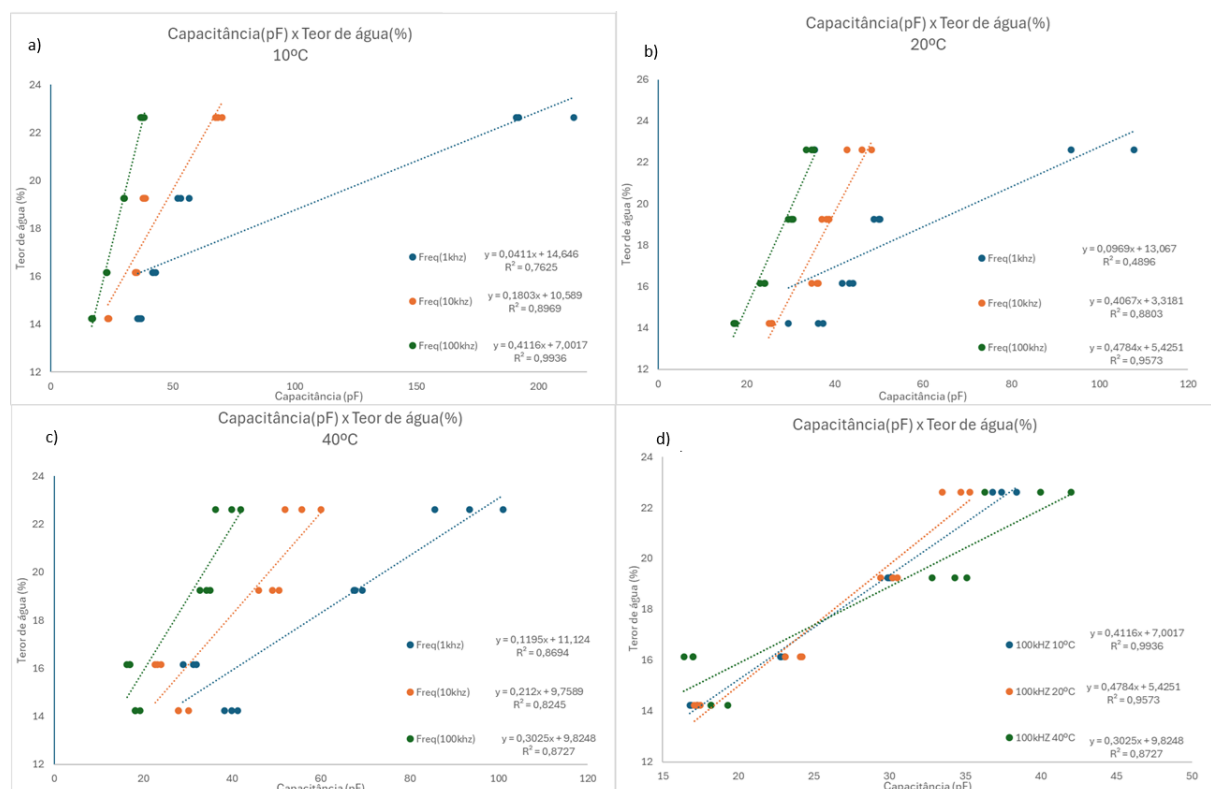


Figura 1. Dados de temperatura interna dos sensores DHT11 e LM35 comparados à estação meteorológica.

Fonte: Autor.

Os resultados confirmam a potencialidade do sensor capacitivo cilíndrico como ferramenta para estimativa da umidade de grãos. Recomenda-se a operação em frequências

mais elevadas (100 kHz), que proporcionam maior precisão e confiabilidade, reduzindo o impacto de variações ambientais. Contudo, em condições de altas temperaturas ($\geq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$), torna-se necessária a aplicação de correções ou calibrações adicionais, a fim de minimizar distorções na predição do teor de água.

4. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que um sensor capacitivo cilíndrico responde linearmente à variação de umidade em grãos, com a frequência de 100 kHz proporcionando os melhores resultados de predição. Verificou-se que temperaturas mais baixas ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$) aumentam a precisão das medições, enquanto temperaturas altas ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$) podem exigir calibrações adicionais. Assim, o sensor avaliado é uma ferramenta promissora para o monitoramento eficiente da umidade em sistemas de armazenamento e pós-colheita, especialmente quando operado em altas frequências.

5. REFERÊNCIAS

BERBERT, P. A. et al. Adaptação da função dielétrica para determinação do teor de água em sementes de feijão por radiofrequências. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 8, n. 2/3, p. 266-273, 2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regras para Análise de Sementes*. Brasília: MAPA/ACS, 2009.

KROESSIN, F. et al. Permissividade dielétrica e qualidade fisiológica de sementes de coentro beneficiadas em mesa de gravidade. In: *XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA*, 2020. Anais [...].

MORITZ, A. et al. Comparação de métodos para a determinação do teor de umidade em grãos de milho e de soja. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, v. 5, n. 2, p. 145-154, 2012.

MOURA, E. E. Proposta computacional para medição on-line do teor de água de grãos de sorgo. 2012. 147 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

SOARES, K. J.; BERBERT, P. A.; OLIVEIRA, M. T. R. Modelos dielétricos para estimar o teor de água de sementes de arroz da cultivar BRS Esmeralda. *Resumo Expandido – Evento Técnico-Científico*, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2010.

TRABELSI, S.; NELSON, S. O. A new coaxial probe for moisture sensing in granular materials. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 56, n. 4, p. 1481-1486, 2007.

KANDALA, C. V. K.; SUNDARAM, J.; LAWRENCE, K. C. Development of a universal moisture sensor for cereal grains and nuts. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, v. 6, n. 3-4, p. 119-126, 2012.