

---

## ANÁLISE DE SENSOR CAPACITIVO DE BAIXO CUSTO PARA UTILIZAÇÃO NA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE DE GRÃOS

<sup>1</sup> LETÍCIA L. SANTOS✉, <sup>2</sup> VICTOR SILVA, <sup>2</sup> HENRIQUE F. LANDIM, <sup>3</sup> GEFERSON P. DA PAIXÃO, <sup>4</sup> LÍBIA D. SANTOS, <sup>5</sup> THOMÁS V. DE OLIVEIRA

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia

<sup>2</sup>Universidade Federal de Viçosa

\*e-mail: leticialusantos@ufu.br

**RESUMO** - O Brasil possui posição de destaque como um dos maiores produtores de grãos do mundo. No entanto, devido ao elevado custo, a maior parte dos pequenos produtores não possuem acesso à equipamentos determinadores de umidade, e a ausência deste controle tem resultado em prejuízos financeiros devido à perda da qualidade dos grãos armazenados com umidade inadequada. Este trabalho buscou, portanto, analisar a eficiência de um sensor de baixo custo para determinação de umidade de grãos, para posterior utilização em equipamentos determinadores de umidade. Os resultados demonstraram correlação significativa entre a capacitância lida pelo sensor e a umidade dos grãos, indicando que o sensor capacitivo analisado possui potencial para aplicação em equipamentos determinadores de umidade de grãos de baixo custo. No entanto, para melhorar a precisão e repetibilidade das leituras, variáveis como temperatura e massa da amostra também devem ser monitoradas e acrescentadas ao modelo.

### INTRODUÇÃO

A produção de grãos no Brasil desempenha um papel de extrema relevância tanto a nível econômico quanto em relação à disponibilidade de alimentos. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, projeta um crescimento uniforme da produção para os próximos 10 anos (MAPA, 2023). O ciclo de 2022/23, por exemplo, registrou um aumento estimado de 15% na produção de grãos em comparação com a temporada anterior, totalizando 312,5 milhões de toneladas (Conab, 2023). Esse aumento não é apenas resultado do aumento da área cultivada, mas também da melhoria da produtividade das principais culturas, como soja, milho, feijão, algodão, girassol, mamona e sorgo.

Em relação ao perfil desses produtores, em 2017, aproximadamente 77% eram classificados pelo IBGE como “agricultores familiares” e “agricultores de pequeno porte” (IBGE, 2017). Esses produtores muitas vezes

enfrentam diversos desafios no dia a dia do trabalho, como, por exemplo, para a determinação da umidade dos grãos, que é uma operação determinante para a tomada de decisão quanto ao momento de se armazenar sua produção de grãos. Sabe-se que ao final da safra, as indústrias processadoras de grãos exigem um teor de umidade máximo para a aquisição da produção, necessitando, normalmente da realização de um procedimento de secagem dos grãos.

Devido ao elevado custo, a maior parte dos pequenos produtores não possuem, em sua propriedade, equipamentos para a determinação da umidade dos grãos. Além disso, a falta de conhecimento e a inacessibilidade a tais ferramentas limita sua capacidade de monitorar adequadamente a umidade de sua produção, e, como consequência, resulta em perdas financeiras devido queda de qualidade devido ao armazenamento de sua produção com umidade inadequada.

## **A importância da umidade na comercialização e armazenamento de grãos**

A umidade dos grãos é uma característica extremamente importante na determinação de sua qualidade e sua capacidade de ser armazenado ao longo do tempo. Porém, além da umidade, variáveis como condições ecológicas, propriedades físico-químicas e biológicas dos grãos, período que se pretende armazenar e tipo de estrutura de armazenamento também influenciam diretamente na qualidade e estabilidade do produto durante o armazenamento (Valdes *et al.*, 2016).

Em regiões tropicais úmidas, como é comum em muitas partes do Brasil, o desafio de conservar grãos é ampliado devido às altas temperaturas e umidade relativa. Sob essas condições, o desenvolvimento de fatores que causam deterioração nos grãos é favorecido, incluindo o crescimento de micro-organismos, produção de toxinas, além do aumento da atividade metabólica dos grãos (Valdes *et al.*, 2016). Esses problemas podem gerar consequências como a perda de volume de grãos armazenados, assim como a redução na qualidade do produto, impactando diretamente o valor do produto e sua disponibilidade como alimento no mercado (Faroni *et al.*, 2006)

A umidade também tem um papel fundamental na determinação do rendimento industrial de certos grãos. Para manter a qualidade e a durabilidade dos grãos, é essencial mantê-los limpos, secos (geralmente com cerca de 13,5% de umidade) e livres de danos mecânicos. O armazenamento de grãos úmidos pode ser problemático, resultando em custos adicionais e desafios logísticos. Assim, métodos eficazes de secagem são necessários para eliminar o excesso de umidade dos grãos a curto prazo e garantir sua conservação (Valdes *et al.*, 2016).

Por outro lado, além das perdas financeiras resultantes da deterioração dos grãos, observa-se que o pequeno produtor também fica sujeito a perdas financeiras provenientes da falta de poder de barganha (Boareto *et al.*, 2020). Devido à impossibilidade de monitorar a umidade, esses produtores deixam de armazenar sua produção e a comercializa logo após a colheita, durante

o período de safra em que há grande oferta de seu produto no mercado. A possibilidade de armazenar a produção e aguardar melhora nos preços, muitas vezes, é o que viabiliza a produção com lucro em pequenas propriedades (Oliveira *et al.*, 2018).

## **Sensores para determinadores de umidade de grãos**

Conforme contextualizado, a disponibilidade de determinadores de umidade acessíveis ao pequeno produtor e de fácil utilização possui importância significativa agronegócio de grãos.

Com o objetivo de garantir a transparência nas transações comerciais, a segurança alimentar e a qualidade dos produtos agrícolas, a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) e o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) possuem diretrizes e regulamentações específicas em relação aos medidores de umidade de grãos oficiais. Tais exigências e especificações aumentam significativamente o custo destes equipamentos, tornando-os inacessíveis ao pequeno produtor.

Portanto, entende-se que o desenvolvimento de tecnologias de baixo custo que auxiliem o pequeno produtor na determinação da umidade de seu lote de grãos e, assim, o apoiem em tomadas de decisão acerca do momento de armazenar seu produto com qualidade, seja premente (Flor *et al.*, 2022).

No mercado, diversos tipos de sensores de umidade estão disponíveis para atender às necessidades de diferentes usuários. Métodos indiretos, que não requerem a destruição da amostra, são frequentemente preferidos devido à sua conveniência. Isso inclui métodos como resistência ou capacitância elétrica, micro-ondas, métodos de medição magnética, ressonância magnética, radar de banda ultra larga e métodos ultrassônicos (Flor *et al.*, 2022). Esses métodos de determinação indireta, correlacionam algumas propriedades dos grãos que variam conforme o seu teor de umidade, como, por exemplo, as propriedades elétricas, dielétricas, atenuação de micro-ondas, etc. (Flor *et al.*, 2022). Atualmente, a maioria dos determinadores de umidade

indiretos utilizam sensores capacitivos. Um capacitor consiste em um dispositivo que pode reter ou armazenar uma carga elétrica. Estes sensores são estruturados, portanto, como um capacitor, em que a substância dielétrica de preenchimento são os grãos, e o seu teor de umidade afeta diretamente a constante dielétrica do meio “ $k$ ”, que, por sua vez, possui correlação direta com a capacitância “ $C$ ” medida, conforme Equação 1, em que “ $A$ ” corresponde à área das placas e “ $d$ ” corresponde à distância entre elas (Flor *et al.*, 2022)

$$C = \frac{k \cdot A}{4\pi d} \quad (1)$$

Este trabalho busca, portanto, analisar o potencial de um sensor capacitivo de baixo custo para ser utilizado em determinadores de umidade de grãos, permitindo ao pequeno produtor rural determinar de forma simples e autônoma a umidade de seu lote de grãos e dando a ele autonomia para decidir o melhor momento para se armazenar o produto baseado na informação de umidade medida tecnicamente.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Instalações

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Operações e Processos, do Departamento de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Viçosa e no Laboratório de Modelagem e Simulação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia *campus* Patos de Minas.

### Montagem do aparato experimental de determinação de umidade

Para a montagem do aparato de determinação de umidade, foram utilizados os seguintes materiais: 1) placa Arduino UNO; 2) sensor de umidade capacitivo V 2.0 (3,3 a 6V) (Figura 1); 3) Display LCD 16x2 para Arduino com backlight azul e 4) conjunto de jumpers e conexões.



Figura 1: Sensor capacitivo de baixo custo utilizado no experimento.

O sistema foi programado utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado para Arduino (IDE).

### Determinação de umidade das amostras

Para avaliar a aplicabilidade deste sensor para a análise da umidade de grãos, foram utilizados 2 kg de feijões vermelhos (*Phaseolus vulgaris*) recém-colhidos, gentilmente doados pela empresa L&M Consultores e Associados, foram fracionados em unidades amostrais de 200 g.

Inicialmente, procedeu-se a análise de umidade dos grãos por meio de um método direto utilizando-se estufa convectiva conforme (AOAC 934.1, 1998), em que cada unidade amostral de 200 g foi adicionada em estufa convectiva (DDL SEC-100-ANA, Brasil) à 105 °C. As amostras foram mantidas em estufa por 8 horas e, em seguida, a cada 2 horas uma amostra foi retirada e pesada em balança de semi-analítica (Bel L303iH, Brasil). A umidade “ $U$ ” foi calculada de acordo com a Equação 2, em que “ $P_f$ ” representa a massa (g) perdida após a secagem e “ $P_i$ ” representa o peso inicial das amostras.

$$U = \frac{(P_i - P_f)}{P_f} \times 100 \quad (2)$$

### Curva de calibração do sensor

À medida que as amostras eram retiradas da estufa e pesadas, realizava-se, imediatamente, a leitura de capacitância por meio do sensor capacitivo em estudo acoplado ao aparato construído. Três sensores idênticos foram utilizados para analisar a repetibilidade da leitura de capacitância entre eles.

Como controle, também foi realizado a leitura da umidade das amostras utilizando um determinador de umidade oficial, Geahaka Agri G6000, que também funciona baseado no princípio da alteração da capacitância medida em função da umidade dos grãos.

Ao final, foi construído um gráfico de dispersão (“scatterplot”) para cada sensor correlacionando a capacitância lida pelo sensor em expressa em “raw counts” (“dados brutos”) e a umidade determinada pelo método direto utilizando-se estufa convectiva. Como a relação entre a capacitância e a constante dielétrica linear, por meio do Método dos Mínimos Quadrados (Berk, 2006) calculou-se para cada sensor uma equação de uma reta que melhor descrevesse o conjunto de dados obtidos. A qualidade do ajuste foi verificada por meio do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de cada curva calculada.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2 é possível observar o esquema de ligação dos componentes utilizados na elaboração do aparato para determinação da umidade, e na Figura 3 uma imagem do aparato construído (2B), em que é possível observar à esquerda um recipiente para inserção dos grãos onde o sensor foi posicionado e, à direita, o botão de acionamento do equipamento e o display onde as leituras eram realizadas. em tempo real.

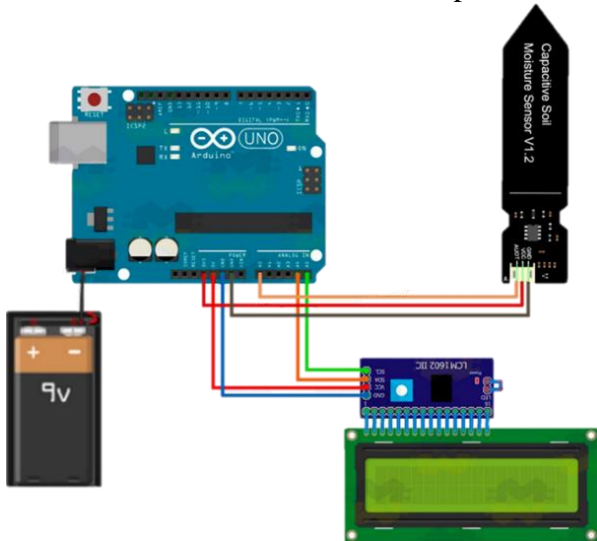


Figura 2: Esquema de ligação utilizado para a elaboração do aparato de determinação de umidade



Figura 3: Fotografia do protótipo montado.

Na Figura 4 (A, B e C) é possível observar as curvas que correlacionam a umidade (%) determinada pelo método direto da estufa a 105 °C e os valores obtidos por cada um dos sensores capacitivos (“Raws Counts”) utilizados no experimento. Para cada sensor foi elaborada uma equação de calibração, apresentadas nos respectivos gráficos.

Ao analisar os coeficientes de determinação das curvas de calibração apresentadas nas Figuras 4A, 4B e 4C, superiores a 0,95 para cada sensor separadamente, indicando que há correlação significativa entre os dados de leitura dos sensores e a umidade dos grãos (Walpole *et al.*, 1996).

Conforme apresentado, o objetivo de se desenvolver de determinadores de umidade com valores acessíveis, é tornar esse equipamento disponível ao pequeno produtor para apoiá-lo em decisões cotidianas, como decidir o momento certo para armazenar o seu grão. Desta forma, pequenos desvios de até 1% são aceitáveis, e não promovem impacto significativo na decisão de armazenar os grãos por curto prazo até o momento de sua comercialização.

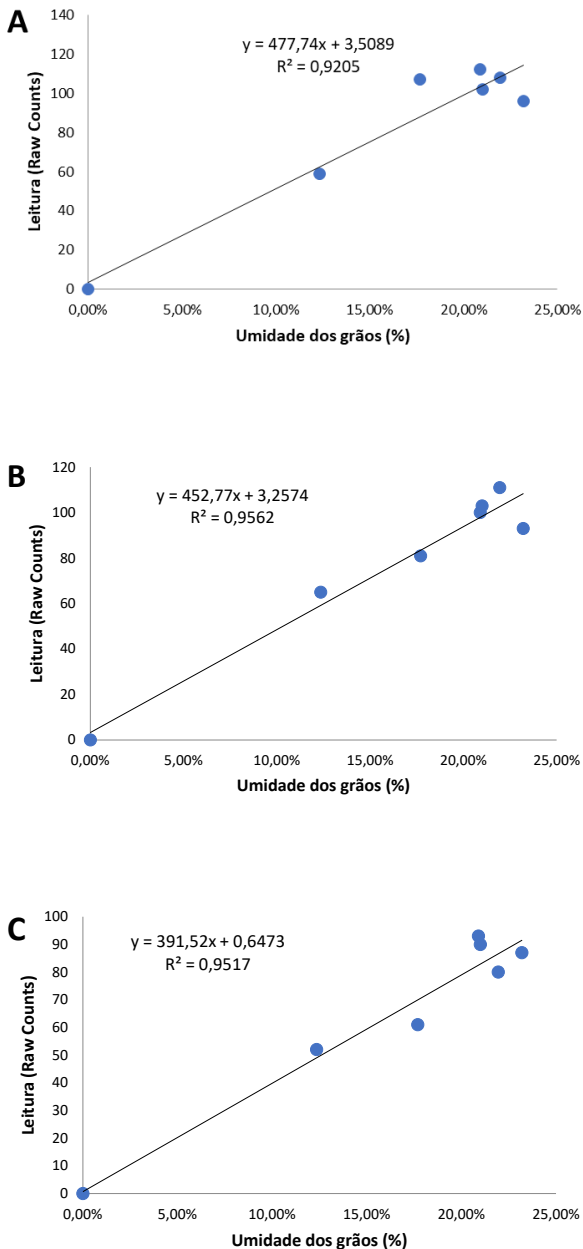


Figura 4: Curva de calibração de 1º grau calculada para cada um dos sensores capacitivos utilizados no experimento

Porém, se plotarmos em um único gráfico os dados lidos pelos diferentes sensores (Figura 5), observa-se que há uma grande variação nas leituras obtidas entre os diferentes sensores. A curva de primeiro grau calculada para este conjunto de dados possui coeficiente de determinação de, aproximadamente, 0,79, não podendo ser utilizada para correlacionar os valores lidos com os valores de umidade dos grãos (Walpole *et al.*, 1996).

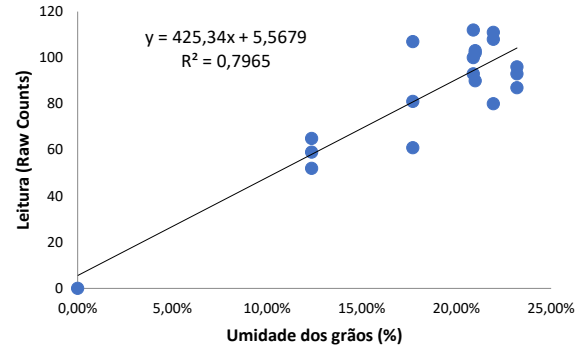


Figura 5: Curva de calibração de 1º grau calculada para todos os dados obtidos dos sensores capacitivos utilizados no experimento

Este resultado nos dá indícios de falta de repetibilidade entre os sensores. No entanto, é possível que o planejamento experimental utilizado possua fontes de erro que, uma vez corrigidas, minimizem tais diferenças observadas entre os sensores.

A primeira fonte de erro identificada consiste na temperatura de análise. Após a retirada das amostras da estufa e posterior pesagem, realizou-se diretamente as leituras utilizando o sensor capacitivo. Uma vez que a leitura era realizada, substituía-se o sensor para a realização de uma nova leitura. Desta forma, os grãos iam reduzindo sua temperatura até se equilibrarem com a temperatura ambiente. Conforme descrito por Runt *et al.* (2005), além das características do material, a constante dielétrica do meio também é uma função da temperatura. Essa correlação é específica para cada material e das condições em que ele está submetido, e proveniente da alteração dos momentos dipolares dos átomos do material em função das mudanças de temperatura (Runt *et al.*, 2005). Conseqüentemente, a variação de temperatura de uma mesma amostra entre as leituras realizadas pelos diferentes sensores pode ter sido uma das fontes de erro experimental.

Outra possível fonte de erro durante a calibração consiste na falta de padronização da massa de grãos colocadas no aparato de determinação de umidade. O protótipo utilizado não possuía célula de carga e o controle da quantidade da amostra de grãos foi realizado por meio do controle do volume. Uma vez que os grãos preenchiam o espaço reservado para as amostras no aparato

experimental, realizava-se a leitura. Conforme demonstrado por Chen *et al.* (2021), a massa do meio utilizado como dielétrico interfere diretamente na capacidade do capacitor. Acredita-se, portanto, que a falta de controle da massa de grãos durante as leituras também possa ter contribuído no aumento da variabilidade das leituras realizadas entre os capacitores para uma mesma amostra de grão.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliada a viabilidade de se utilizar um sensor capacitivo de baixo custo para a construção de determinadores de umidade acessíveis à pequenos produtores rurais. O modelo do sensor analisado se mostrou eficiente para tal aplicação, apresentando correlação satisfatória entre os valores lidos e a umidade das amostras. Por outro lado, observou-se que diferentes unidades do mesmo sensor apresentaram variações de leitura para uma mesma amostra. Apesar do grande potencial identificado, experimentos complementares serão realizados monitorando-se a temperatura e a massa das amostras, adicionando tais variáveis ao modelo de calibração e, conseqüentemente, aprimorando o equipamento determinador de umidade proposto.

## REFERÊNCIAS

- BERK, K., Data Analysis, Cengage Learning, 2006.b
- BOARETTO, R. M. et al. Quality parameters and commercial value of soybean grains produced in different regions of Brazil. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 50, n. 6, e20190445, 2020.
- CHEN, Y.; CASTIGLIONE, J.; ASTROZA, R.; LI, Y. parameter estimation of resisto-capacitor models for building thermal dynamics using the unscented Kalman filter. *Journal of Building Engineering*, v.34, 2021.
- CONAB. Produção de grãos está estimada em 312,5 milhões de toneladas na safra 2022/23. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4971-producao-de-graos-estimada-em-312-5-milhoes-de-toneladas-na-safra-2022-23>>. Acessado em: 26 de agosto de 2023.
- FARONI, L.R.A.; CORDEIRO, I.C.; ALENCAR, E.R.; ROZADO, A.F.; ALVES, W.M. Influência do conteúdo de umidade de colheita e temperatura de secagem na qualidade do feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10(1), 2006.
- FLOR, O.; PALACIOS, H.; SUÁREZ, F.; SALAZAR, K.; REYES, L.; GONZÁLEZ, M.; JIMENEZ, K. New Sensing Technologies for Grain Moisture. *Agriculture*, v. 12, n. 3, 386, 2022.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2017: Resultados Preliminares. 2017.
- MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Produção de grãos brasileira deverá chegar a 390 milhões de toneladas nos próximos dez anos. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-brasileira-devera-chegar-a-390-milhoes-de-toneladas-nos-proximos-dez-anos>>. Acessado em: 26 de agosto de 2023.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Projeções do Agronegócio: Brasil – 2022/23 a 2032/33. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-brasileira-devera-chegar-a-390-milhoes-de-toneladas-nos-proximos-dez-anos/ProjeesdoAgronegocio20232033.pdf>>. Acessado em: 26 de agosto de 2023.
- OLIVEIRA, E. C. A.; ANDRADE, G. A.; ALVES, E. S. Análise da relação entre produtores de grãos, atravessadores e empresas compradoras no Brasil. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, Taubaté, v. 14, n. 4, p. 276-296, 2018.
- RUNT, J.P.; MARTIN, J.E.; PLANJE, M.A. Dielectric Spectroscopy of polymers: A Review. *Macromolecules*, 2005.
- VALDES, Y. B.; DURAÑONA, H.; ROCA, R. A. Efecto de la temperatura y la

humedad em la conservación de granos de maíz em silos metálicos refrigerados. Cultivos Tropicales 2016, 37, p. 105-114.  
WALPOLE. R.E.; MYERS, R.H.; MYERS, S.L.; YE, K. Introdução à Estatística. LTC, Livros Técnicos e Científicos, 1996.

### **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal de Uberlândia pelo financiamento das bolsas e à empresa Lopes e Machado Consultores Associados por, gentilmente, ceder os materiais utilizados no experimento.