

VALIDAÇÃO DO MODELO TEÓRICO DE UM SENSOR CAPACITIVO DE PLACAS PARALELAS

GABRIEL RODRIGUES¹; ALAN JÚNIO DA SILVA BORELA²; RICARDO SCHERER POHNDORF³; DANIEL DE CASTRO MACIEL⁴; ÁDAMO DE SOUSA ARAÚJO⁵

¹Universidade Federal de Pelotas – gabriel.rd@icloud.com

²Universidade Federal de Pelotas – alanjunior95@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – ricardoscherer.eng@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – daniel.maciel@ufpel.edu.br

⁵Universidade Federal de Pelotas – adamo.araujo@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

As propriedades físicas de grãos e sementes, como o teor de água, a temperatura e a composição química, são parâmetros fundamentais frequentemente utilizados para avaliar a qualidade e as condições ideais para o processamento e armazenamento seguro. O teor de água, também conhecido como grau de umidade dos grãos e sementes pode ser determinado de maneira indireta, rápida e não destrutiva por meio da medição da permissividade dielétrica. Com o aumento da demanda por monitoramento e controle em tempo real em agroindústrias, a aplicação desse conceito surge como uma solução eficiente (TRABELSI; KRASZEWSKI; NELSON, 1999).

A medição rápida, exata e precisa do teor de água em grãos e sementes é crucial para as operações de colheita, secagem, armazenamento, comercialização e processamento de produtos agrícolas. No entanto, a determinação do teor de água por métodos tradicionais, como o uso de estufas com convecção gravitacional ou forçada, é bastante demorada, podendo levar até 72 horas em alguns casos. Por isso, esse tipo de medição tem se tornado adequado apenas para um número limitado de operações rotineiras em unidades de manuseio de grãos (BERBERT et al., 2004).

As propriedades dielétricas, ou permissividade, de materiais agrícolas e produtos alimentares são indicadores importantes de como esses materiais interagem com um campo elétrico. Em particular, as frequências de microondas, juntamente com as propriedades dielétricas, determinam a velocidade de aquecimento que os materiais experimentam quando expostos a campos elétricos intensos nessas frequências (SACILIK; COLAK, 2010).

Os sensores capacitivos são amplamente utilizados para medir o teor de água em grãos, devido às grandes diferenças na permissividade dielétrica entre a matéria seca e a água presente nos grãos. Contudo, essas medições são influenciadas por fatores como a massa específica dos grãos, a temperatura e a umidade relativa do ar, além das características geométricas do capacitor de placas paralelas, como a área e a distância entre as placas, assim como o efeito de borda do campo elétrico gerado fora do interior do capacitor. Este trabalho propõe uma análise inicial da capacitância em função da variação da distância entre as placas do capacitor, comparando os resultados experimentais com o modelo teórico.

2. METODOLOGIA

O trabalho foi realizado no laboratório de Instrumentação Agrícola do Centro de Engenharia da Universidade Federal de Pelotas.

Para o desenvolvimento do capacitor, foram utilizadas duas placas maciças de cobre com dimensões de 100x100 mm, às quais foi soldada uma barra de cobre de ½ polegada de diâmetro para fixação no suporte. O suporte foi confeccionado em Ácido Polilático (PLA) utilizando uma impressora 3D, como ilustrado na Figura 1(a) abaixo.

Figura 1- (a) Capacitor de placas paralelas e a estrutura de fixação. (b) Medidor LCR



Fonte: Autores, 2024

Para realizar as medições experimentais, foi acoplado ao sensor um medidor de resistência, capacitância e indutância – LCR (modelo U1731C da Keysight Technologies®). O LCR é visto na Figura 1(b).

Foi utilizado dez distâncias diferentes entre as placas do capacitor: As distâncias utilizadas são: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 e 5,0 mm. As medições foram realizadas com um paquímetro, garantindo a precisão na determinação das distâncias entre as placas.

Os valores de capacitância teóricos foram calculados a partir da equação:

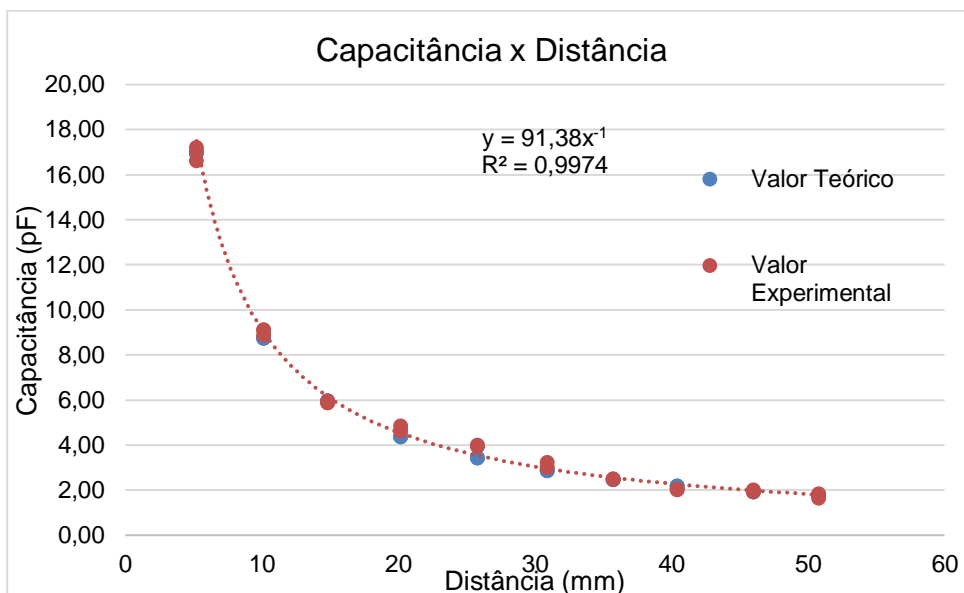
$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} (F)$, onde ϵ_0 : permissividade dielétrica do vácuo ($8,54 \times 10^{-12} F/m$); ϵ_r : permissividade relativa do ar (~ 1); A : área das placas (m^2) e d : distância entre as placas (m).

Foram realizadas três repetições para cada distância entre as placas do capacitor, e uma análise de regressão entre os valores teóricos e os valores experimentais foi conduzida no programa Excel.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2, observou-se a regressão dos dados experimentais em função da distância entre as placas. Os dados experimentais seguiram uma distribuição consistente com os dados teóricos, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) de 0,99, indicando um excelente ajuste ao modelo teórico. O modelo de regressão utilizado foi uma função de potência, o que se mostrou adequado para descrever a relação entre a capacitância e a distância entre as placas, validando a robustez do método aplicado.

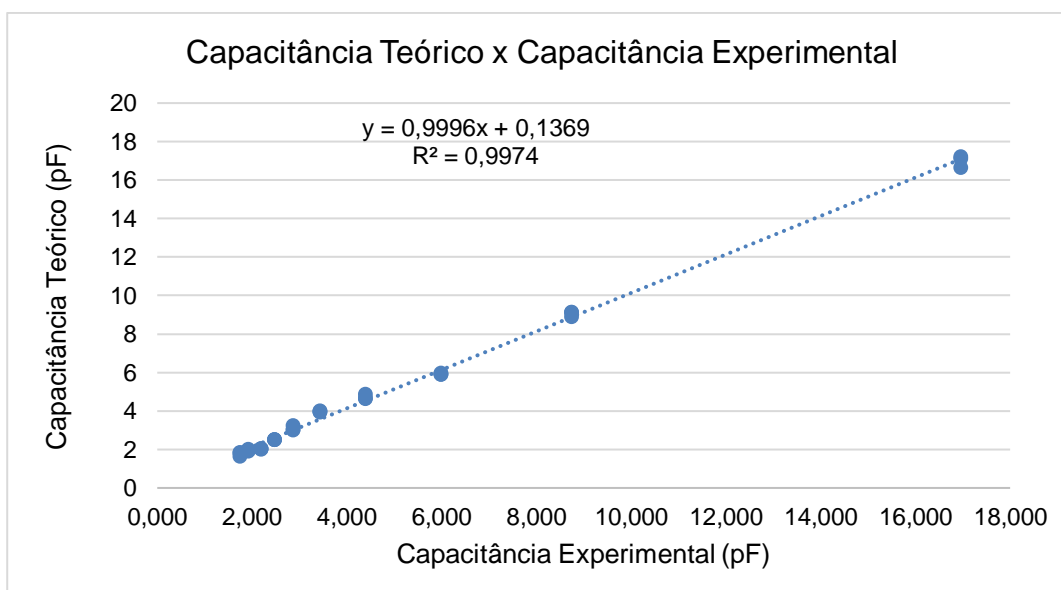
Figura 2- Regressão dos dados de capacitância experimental



Fonte: Autores, 2024

Na Figura 3, é apresentada a regressão entre os dados teóricos e experimentais, o que permitiu visualizar as discrepâncias entre os valores observados. Nota-se um pequeno desvio no coeficiente linear, que pode ser atribuído a erros experimentais, como a imprecisão do equipamento de medição e a variação da temperatura, conforme discutido por Nelson (2015). Esses fatores interferem diretamente nas medições de capacitância, gerando pequenas variações que devem ser consideradas nas análises de precisão dos resultados.

Figura 3- Regressão linear dos dados de capacitância experimental e teóricos



Fonte: Autores, 2024

De acordo com Nussenzveig (1997), o modelo teórico utilizado para o cálculo da capacitância em placas paralelas é válido quando a área das placas é significativamente maior que a distância entre elas, permitindo desconsiderar o efeito de borda do campo elétrico fora das placas. No experimento realizado, a relação entre a área das placas (100x100 mm) e a distância entre elas, que variou de 5 a 50 mm, confirmou a validade do modelo teórico. Assim, foi possível aplicar o modelo com precisão e exatidão para as distâncias testadas, mantendo-se os resultados dentro das expectativas teóricas, ou seja, com baixo erro experimental..

4. CONCLUSÕES

Os dados de capacitância obtidos no experimento, utilizando o sensor capacitivo de placas paralelas com uma área de 100x100 mm e distância de até 50 mm, podem ser devidamente explicados pelo modelo teórico apresentado. Esse modelo considera a relação entre a capacitância, a área das placas, a distância entre elas e a permissividade do material entre as placas, validando as medições realizadas no experimento.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Nussenzveig, H. M. **Física Básica 3 – Eletromagnetismo**. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

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

TRABELSI, S.; KRASZEWSKI, A.W.; NELSON, S. O. New density-independent calibration function for microwave sensing of moisture content in particulate materials. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v.47, n.3, p.613-622, 1998.