

Sensor RF para Monitoramento do Teor de Umidade em Grãos de Feijão

Maura Lúcia Rodríguez Alexandre (IFPB, Campus João Pessoa), Anderson Oliveira de Sousa (IFPB, Campus João Pessoa), Marcus Vinicius Rocha Cohen (IFPB, Campus João Pessoa), Jefferson Costa e Silva (IFPB, Campus João Pessoa), Joabson Nogueira de Carvalho (IFPB, Campus João Pessoa), Alfredo Gomes Neto (IFPB, Campus João Pessoa).

E-mails: maura.rodriguez@academico.ifpb.edu.br, anderson121671771@gmail.com, marcus.rocha@academico.ifpb.edu.br, jefferson@ifpb.edu.br, joabsonnogueira@ifpb.edu.br, alfredogomes@ifpb.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.03.03.04-9 3.04.06.01-3 Teoria Eletromagnética, Microondas, Propagação de Ondas, Antenas.

Palavras-chave: grãos de feijão, teor de umidade, sensor, matrioska.

1. Introdução

A indústria alimentícia está sendo revolucionada pela integração de tecnologias como química, biologia e TI, otimizando a qualidade alimentar. Sensores, nanotecnologia, IA e big data, impulsionados por 5G e IoT, aprimoram a produção do campo ao consumidor [1], [2].

A medição da umidade em grãos é essencial para a qualidade e armazenamento de produtos. Sensores de radiofrequência (RF) se destacam nesse contexto, especialmente com a popularização de VNAs de baixo custo [3]-[4]. Este artigo apresenta um sensor de RF com estrutura DGS-matrioska, focado em feijões (*Phaseolus vulgaris* L.). Ele opera pela alteração da frequência de ressonância devido à interação eletromagnética com o grão, oferecendo fabricação simples, baixo custo e medição sem contato em embalagens não metálicas [4].

2. Materiais e métodos

2.1 Sensor DSG-Matrioska

A geometria matryoshka, apresentada em [5], destaca-se pela interconexão de seus anéis concêntricos. Essa característica permite um aumento no seu comprimento efetivo L_{eff} sem expandir a área ocupada, que é limitada à área do anel mais externo, Fig. 1(a). A miniaturização e a seletividade são atributos que tornam essa geometria atraente para diversas aplicações em micro-ondas e RF [6]. Geralmente, $w_{xma1} = w_{yma1} = w_{ma1}$ e $w_{xma2} = w_{yma2} = w_{ma2}$. Com a primeira aproximação, a frequência de ressonância, $f_{res-calc}$, podendo ser estimada por:

$$f_{res-calc}(GHz) = \frac{0,3}{L_{eff}\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (1)$$

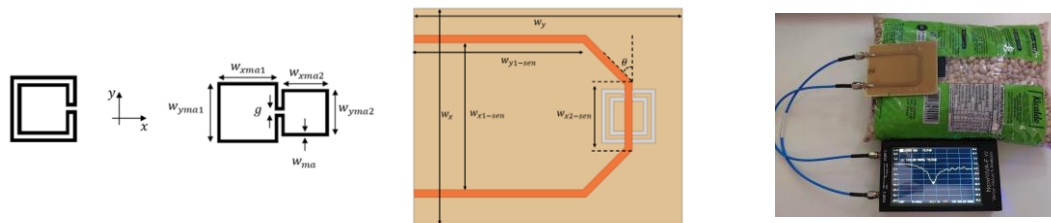
Com o comprimento efetivo, L_{eff} , calculado pela seguinte equação:

$$L_{eff} = 3 \times (w_{ma1-avg} + w_{ma2-avg}) \quad (2)$$

$$w_{mai-avg} = w_{mai} - \frac{w_{ma}}{2}, i = 1,2 \quad (3)$$

ϵ_{reff} , é a constante dielétrica efetiva para a linha de microfita com largura w_{ma} , sobre um substrato de espessura h e constante dielétrica ϵ_r .

Fig. 1 Geometria matrioska, geometria do sensor e configuração de medição;



a) Geometria matrioska e anel expandido

b) Dimensões do sensor

c) Configuração de medição.

Fonte: Autoria Própria (2024).

2.2. Protótipo, Processo de Medição

Esta seção descreve o protótipo do sensor fabricado, Fig. 1(b), e o processo de medição, incluindo a preparação das amostras. Além disso, detalha e discute os resultados obtidos. Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o software HFSS-ANSYS Electronics Desktop [7]. Os resultados medidos foram adquiridos com um LITEVNA [8], Fig. 1(c).

2.2.1 Protótipo do Sensor DGS-Matrioska

O protótipo foi fabricado usando um substrato de fibra de vidro FR-4 de baixo custo, substrato $\epsilon_r = 4.4$ tangente de perda $tg(\delta) = 0.02$, espessura $h = 1.6$ mm, com uma largura de microstrip $w = 2.8$ mm. O ângulo $\theta = 45^\circ$ foi otimizado numericamente, conforme ilustrado na Fig 1(b). A Tabela 1 resume as dimensões do sensor DGS-matrioska.

Tabela 1 – Dimensões do Sensor DGS-matrioska

w_x	w_y	w_{x1-sen}	w_{y1-sen}	w_{x2-sen}	w_{ma1}	w_{ma2}	w_{ma}	g
80	100	54.4	63.0	25.5	22.0	14.0	2.0	1.0

2.2.2. Preparação das Amostras

Quatro amostras de feijão Kicaldo® ("carioca", classe "A") foram preparadas em sacos Ziplock® para medições. Como indicadas na Tabela 2. Com as amostras consideradas secas, a massa foi registrada e um sensor foi usado para determinar a frequência de ressonância.

Tabela 2 – Massa das Amostras

Amostra	I	II	III	IV
Massa (g)	343	319	232	236

Os feijões foram submersos em água por 2 minutos, com o excesso drenado antes de retornar à embalagem plástica. Esse processo foi repetido, medindo-se a massa e a frequência de ressonância a cada 2 minutos, até os 12 minutos, quando os grãos iniciaram o processo de desintegração. O procedimento de medição é mostrado na Fig. 2.

Fig. 2. Processo de Medição



Fonte: Autoria Própria (2024).

3. Resultados e discussão

A Tabela 3 detalha a massa dos grãos ao longo do tempo, permitindo o cálculo do aumento percentual de umidade ($\Delta U\%$) usando a Equação (4), considerando o limite comercial de 14% de umidade no Brasil [9]. Apesar das variações nas massas iniciais, o aumento percentual de umidade foi consistentemente similar entre as amostras, conforme mostrado na Tabela 4 e Fig.3.

$$\Delta U\% = \frac{Mass - Mass_{initial}}{Mass_{initial}} \times 100\% . \quad (4)$$

Para cada amostra e a cada passo de tempo, a resposta em frequência é medida, permitindo a determinação da frequência de ressonância. Respostas em frequência típicas são ilustradas na Fig. 4. Devido as quantidades das amostras serem reduzidas não foi possível fazer um tratamento estatístico mais rigoroso, mas será a continuação da pesquisa, quando serão avaliados também outros fatores como o tipo de embalagem ou mesmo o formato do sensor, além de comparações de custo e de sensibilidade com sensores comerciais.

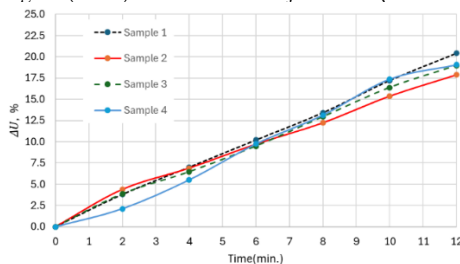
Tabela 3 – Massa das Amostra de Feijão em função do tempo

Time (min.)	Massa I (g)	Massa II (g)	Massa III (g)	Massa IV (g)
0	343	319	232	236
2	356	333	241	241
4	367	341	247	249
6	378	350	254	259
8	389	358	262	267
10	402	368	270	277
12	413	376	276	281

Tabela 4 – ($\Delta U\%$) das amostra de feijão em função do tempo

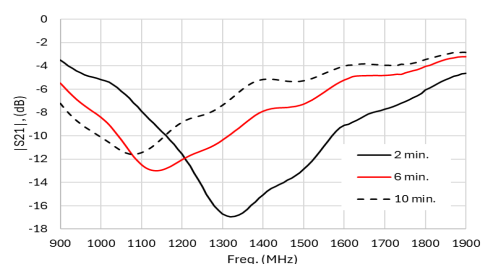
Time (min.)	Massa I (g)	Massa II (g)	Massa III (g)	Massa IV (g)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	3.79	4.39	3.88	2.12
4	7.00	6.90	6.47	5.51
6	10.20	9.72	9.48	9.75
8	13.41	12.23	12.93	13.14
10	17.20	15.36	16.38	17.37
12	20.41	17.87	18.97	19.07

Fig. 3. ($\Delta U\%$) das amostra de feijão em função do tempo.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Fig. 4. Respostas em frequência típicas para cada tempo.



Na Fig. 5, as frequências de ressonância medidas são apresentadas para as amostras em função do tempo e, indiretamente, em função do aumento do teor de umidade dos grãos. Um ponto a ser destacado é que as curvas são monotônicas, permitindo que cada aumento de umidade seja associado a uma única frequência de ressonância.

A Fig. 6 mostra a curva de frequência de ressonância média juntamente com sua interpolação linear, que é representada por (5).

$$freq.res. (MHz) = -16.88 \times \Delta U\% + 1400.60 \quad (5)$$

Fig. 5. Medições das Frequências de Ressonância.

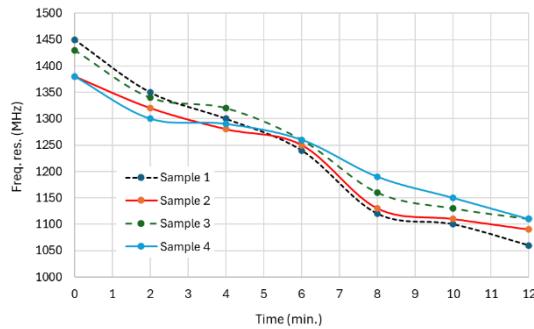
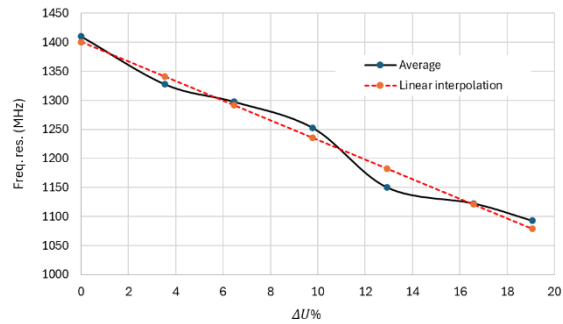


Fig. 6. Curva de Fr média e sua interpolação linear.



Fonte: Autoria Própria (2024).

5. Considerações finais

Este artigo apresentou um sensor de RF para monitorar o teor de umidade de grãos de feijão. Simplicidade e baixo custo são duas características importantes do sensor proposto. O sensor é baseado na variação da frequência de ressonância de uma DGS-matryoshka, para a qual as equações de projeto foram descritas. Um protótipo foi fabricado e utilizado para medir o teor de umidade de quatro amostras de grãos de feijão. Uma importante contribuição deste trabalho foi a descrição detalhada da preparação das amostras. Os resultados medidos foram analisados e uma taxa de $-16.88 \text{ MHz}/\Delta U\%$ foi alcançada, um resultado interessante para o projeto de sensores. Mesmo não tendo sido feito medições com diferentes grãos como: arroz, soja, milho. É de se esperar que as curvas apresentem um comportamento monotômico, porém com diferentes sensibilidades. Para desenvolvimento da pesquisa iremos avaliar a sensibilidade do sensor para pequenas variações de umidade. Ao utilizar um VNA portátil de baixo custo, o sensor proposto é adequado tanto para aplicações em laboratório quanto em campo, se mostrando um eficiente meio de mensuração, além disso, podemos acoplar um sistema de medição similar ao processamento industrial. Embora uma análise estatística mais rigorosa seja necessária, incluindo um número maior de amostras, os resultados iniciais são promissores e apoiam a continuação desta pesquisa.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba – IFPB e ao Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado – GTEMA pelo financiamento e disponibilidade de equipamentos para realização deste trabalho.

Referências

- [1] A. N. Jasim and L. C. Fourati, "Agriculture 4.0 from IoT, Artificial Intelligence, Drone, & Blockchain Perspectives," 2023 15th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE), Baghdad & Anbar, Iraq, 2023, pp. 262-267, doi: 10.1109/DeSE58274.2023.10099927.
- [2] Mohd Javid, Abid Haleem, Ravi Pratap Singh, Rajiv Suman, "Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies," International Journal of Intelligent Networks, vol. 3, 2022, pp. 150-164, <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2022.09.004>.
- [3] O. Flor, H. Palacios, F. Suárez, K. Salazar, L. Reyes, M. González, K. Jiménez, "New Sensing Technologies for Grain Moisture," Agriculture 2022, vol. 12, 386, doi.org/10.3390/agriculture12030386.
- [4] B. L. C. De Albuquerque, G. K. Da Silva Nóbrega, M. d. Santos Ferreira, A. F. D'Andrea, J. N. De Carvalho and A. G. Neto, "A New Soil Moisture Sensor Based on Matryoshka DGS," 2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Castelldefels, Spain, 2023, pp. 130-132, doi: 10.1109/IMOC57131.2023.10379780.
- [5] A. Gomes Neto, A. G. D'Assunção, J. C. e. Silva, A. N. d. Silva, H. d. P. A. Ferreira and I. S. S. Lima, "A proposed geometry for multi-resonant frequency selective surfaces," 2014 44th European Microwave Conference, 2014, pp. 897-900, doi: 10.1109/EuMC.2014.6986580.
- [6] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, J. N. de Carvalho, and C. Peixeiro, "Planar Printed Structures Based on Matryoshka Geometries: A Review," Micromachines, vol. 15, no. 4: 469, 2024. <https://doi.org/10.3390/mi15040469>.
- [7] <https://www.ansys.com>.
- [8] <https://www.zeenko.tech/litevna>.
- [9] BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Normative Instruction nº 12, of March 28, 2008, Art. 10.