



INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA – IFPB
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR
COORDENAÇÃO DO CURSO DE BACHARELADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

PALOMA DA SILVA SANTOS

**INVESTIGAÇÃO DE UM SENSOR DE SACAROSE UTILIZANDO
ESTRUTURA DGS BASEADA NA GEOMETRIA MARIOSKA**

JOÃO PESSOA – PB

2023

PALOMA DA SILVA SANTOS

**INVESTIGAÇÃO DE UM SENSOR DE SACAROSE UTILIZANDO
ESTRUTURA DGS BASEADA NA GEOMETRIA MATRIOSKA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, no Instituto Federal da Paraíba – IFPB, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

JOÃO PESSOA – PB

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

S237i Santos, Paloma da Silva.

Investigação de um sensor de sacarose utilizando estrutura
DGS baseada na Geometria Matrioska / Paloma da Silva Santos.
– 2023.

29 f. : il.

TCC (Graduação - Curso Superior de Bacharelado em
Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba /
Unidade Acadêmica de Processos Industriais, 2023.

Orientação : Prof^o D.r Jefferson Costa e Silva.

1.DGS. 2. Sensor. 3. Geometria matrioska. 4. Sacarose. 5.
Curva de calibração. I. Título.

CDU 621.382(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária - CRB 15/132

PALOMA DA SILVA SANTOS

**INVESTIGAÇÃO DE UM SENSOR DE SACAROSE UTILIZANDO
ESTRUTURA DGS BASEADA NA GEOMETRIA MARIOSKA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, no Instituto Federal da Paraíba – IFPB, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho Aprovado em: _____

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 JEFFERSON COSTA E SILVA
Data: 01/08/2023 08:51:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jefferson Costa e Silva (Orientador)
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

Documento assinado digitalmente
 ALFREDO GOMES NETO
Data: 01/08/2023 09:08:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alfrêdo Gomes Neto
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

Documento assinado digitalmente
 JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO
Data: 01/08/2023 09:18:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Joabson Nogueira de Carvalho
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus em toda a sua grandiosidade.

A Mainha e Gabrielle que onde estiverem estão me guiando.

Ao meu pai que nunca duvidou da minha capacidade e me apoiou em toda essa jornada.

A minha irmã, meus avós e minhas tias que sempre acharam o máximo eu vir pra tão longe estudar.

Aos meus professores que me ensinaram muito além da ementa.

Ao meu orientador que aceitou entrar nessa junto comigo.

As minhas amigas de Cachoeirinha que apesar de longe sempre se fizeram presentes.

Aos meus amigos que conquistei na faculdade e me ajudaram a enfrentar essa fase tão desafiadora de minha vida.

E por fim a mim mesma, por nunca ter desistido.

RESUMO

Estando estimada sua produção na safra 2022/2023 em 33,9 milhões de toneladas, a sacarose, ou simplesmente açúcar, produzida a partir da cana-de-açúcar, é um dos principais produtos do agronegócio brasileiro. Desse modo, a investigação de tecnologias que possam atuar inerentemente a essa matéria-prima são bastante promissoras. Neste trabalho de conclusão de curso é apresentando o estudo de um sensor utilizando uma estrutura com defeito no plano terra baseado na geometria matrioska capaz de determinar o nível de diluição de sacarose em solução aquosa. Aqui é descrito o projeto do sensor DSG, incluindo as respectivas equações iniciais, tendo estas sua aplicabilidade confirmada por meio de verificação numérica e experimental. Quando mensurado para líquidos com diferentes concentrações de sacarose e água destilada, foi possível a obtenção da curva de calibração do sensor DGS. Tais resultados se mostram promissores e estimulam a continuidade das pesquisas neste mesmo assunto, em busca de processos cada vez mais avançados.

Palavras-chave: DGS, geometria matrioska, sacarose, curva de calibração

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha de microfita com estrutura DSG.	10
Figura 2 – Estrutura DGS.	11
Figura 3 – Interação dos campos eletromagnéticos com o meio.	11
Figura 4 – Geometria Matrioska.	13
Figura 5 – Geometria Matrioska - Dimensões.	13
Figura 6 – Vista superior e inferior do protótipo utilizado nas medições.	16
Figura 7 – Esquema de medição do sensor.	16
Figura 8 – Sensor DGS preenchido de ar ($\epsilon_r = 1,0$).	17
Figura 9 – Proporções utilizadas para elaboração da solução de sacarose.	18
Figura 10 – Frequência de ressonância do sensor DGS para: vazio, 100% sacarose e 100% água de água destilada.	19
Figura 11 – Resposta em frequência do sensor DGS para diferentes percentuais de sacarose e água destilada.	19
Figura 12 – Curva de calibração do sensor DGS.	20
Figura 13 – Resposta em frequência em função do percentual de sacarose na mistura.	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores medidos e simulados.	17
Tabela 2 – Percentuais durante os testes.	18

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAB Companhia nacional de abastecimento

PCI Placas de circuito impresso

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ_r	Permissividade elétrica relativa (Constante dielétrica)
ϵ_{ref}	Permissividade elétrica relativa efetiva (Constante dielétrica efetiva)
g	Largura de fenda
h	Espessura do substrato
L_{ef}	Comprimento efetivo do anel de matrioska
L_{ext}	Comprimento externo do anel de matrioska
t	Espessura da camada de metalização de linha de microfitas
w	Largura da linha de microfitas

SUMÁRIO

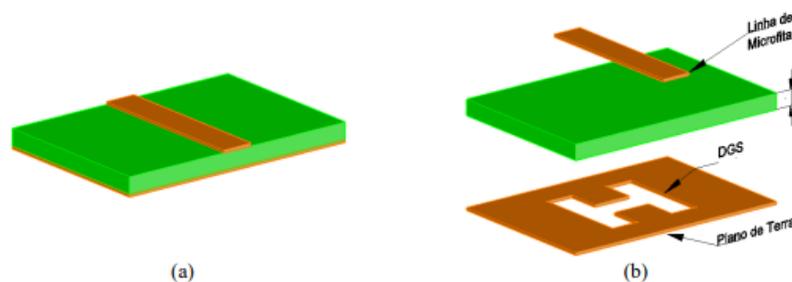
1	Introdução	10
2	Justificativa	12
3	Fundamentação Teórica	13
4	Objetivos	15
4.1	OBJETIVO GERAL	15
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
5	Resultados	16
6	Considerações Finais	22
	REFERÊNCIAS	23
7	Anexo A - Determinação do Nível de Diluição de Sacarose em Solução Aquosa Utilizando um Sensor DGS Baseado na Geometria Matrioska	24

1 INTRODUÇÃO

Os dispositivos eletrônicos denominados de sensores, são equipamentos sensíveis a formas de energia do ambiente, estabelecendo relações sobre uma grandeza física a que se deseje mensurar, tais como: temperatura, velocidade e corrente (WENDLING, 2010). Na execução do projeto de um sensor deve-se levar em consideração a escolha do material mais adequado para atuar como camada sensível ao elemento com o qual irá interagir, por exemplo, se esse material é corrosivo. Na prática, estes dispositivos muitas vezes operam em monitoramento contínuo de concentrações baixas de apenas um componente, como o nível de sacarose presente em uma solução de água destilada (HADANO, 2020).

Entretanto alguns sensores demandam uma velocidade de atualização considerável graças à alta taxa de obsolescência de suas tecnologias, uma opção viável para substituição de alguns desses sensores consiste na produção de sensores com Placas de circuito impresso (PCI), uma vez que possuem baixo tempo de fabricação, materiais de preço acessível e possibilitam a individualização de cada tipo de projeto (REIS, 2015). Um exemplar de sensor construído com PCI são o sensores que utilizam a tecnologia de microfita com estrutura DGS. A primeira estrutura desse tipo foi apresentada no ano de 1999 (SENA, 2018), possuindo formato de alteres retangular, tal qual ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Linha de microfita com estrutura DGS.



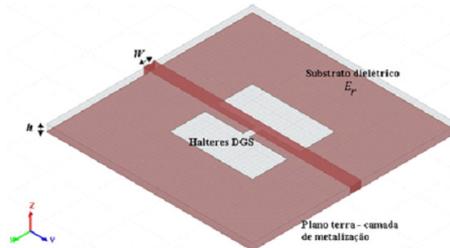
a) visão geral b)Elementos constituintes.

FONTE: (SENA, 2018)

Em sua essência, uma estrutura DGS é construída a partir da modificação do plano terra graças a remoção de uma determinada geometria de sua camada de metalização, Figura 2. De modo que, na região do DGS os campos eletromagnéticos interagem diretamente com o meio (SILVA, 2022), Figura 3. O dimensionamento da estrutura a ser removida é um dos parâmetros com maior flexibilidade na construção de

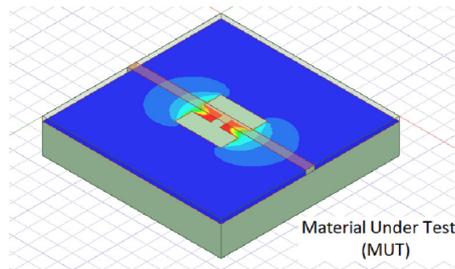
um projeto com essas configurações. Essa alteração é de grande significância, pois a partir dela a resposta em frequência pode ser ajustada. Por fim, outra característica significativa desse tipo de estrutura é a possibilidade de miniaturização do projeto (FERREIRA, 2021).

Figura 2 – Estrutura DGS.



FONTE: (SILVA, 2022)

Figura 3 – Interação dos campos eletromagnéticos com o meio.



FONTE: (SILVA, 2022)

Entende-se que as diferentes geometrias da estrutura DGS (halteres, haltere de espira aberta, ponta de seta, interdigital etc) apresentam diferentes características (SENA, 2018), de modo que cada estrutura DGS pode ser configurada para uma situação específica, surgindo a necessidade de que novas geometrias sejam desenvolvidas. Nesta condição, um sensor DGS de sacarose baseado na geometria matrioska é investigado neste TCC. Aqui, propõe-se avaliar se este tipo de sensor possui capacidade para detectar a variação de uma solução composta por sacarose e água destilada em diferentes concentrações. A ideia é fazer uma investigação inicial, que pode vir a incitar um processo de inovação tecnológica, por meio da investigação de um novo tipo de sensor sacarose.

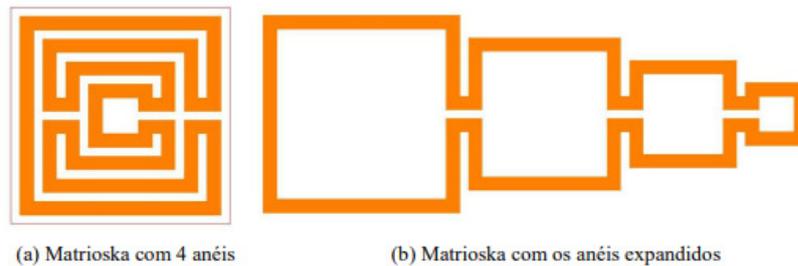
2 JUSTIFICATIVA

A sacarose, ou simplesmente açúcar, produzida a partir da cana-de-açúcar, é um dos principais produtos do agronegócio brasileiro, de acordo com a Companhia nacional de abastecimento (CONAB). Para a safra 2022/2023, a produção de açúcar está estimada em aproximadamente 33,9 milhões de toneladas (CONAB, 2022),(PATRICIO *et al.*, 2022). Dada a sua importância no mercado financeiro nacional e internacional, há um segmento focado na síntese de derivados de açúcar denominado como Sucroquímica. Um indicativo significativo do potencial tecnológico da sacarose como matéria-prima, é o elevado número de patentes de aplicações somente para os ésteres de sacarose, destoando por sua vez, do baixo número de artigos científicos publicados sobre o tema (BOSCOLO, 2003). Desta forma, torna-se justificável o desenvolvimento de sensores que possam monitorar o nível de diluição de sacarose como o apresentado neste TCC.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A geometria matrioska recebe esse nome pois foi baseada nas famosas bonecas russas que são organizadas umas dentro das outras, da maior até a menor. De maneira análoga, o sensor é composto por anéis concêntricos, de modo que, os anéis permanecem interligados, formando, um único anel, característica que é ilustrada na Figura 4, sendo essa configuração responsável por aumentar o seu comprimento efetivo (CRUZ, 2015). Nos trabalhos de (FERREIRA, 2014) e (NETO *et al.*, 2015), apresenta-se a possibilidade de variação da quantidade de anéis a ser considerada de acordo com o escopo do projeto, porém neste TCC somente será analisada a geometria matrioska composta por dois anéis concêntricos interligados.

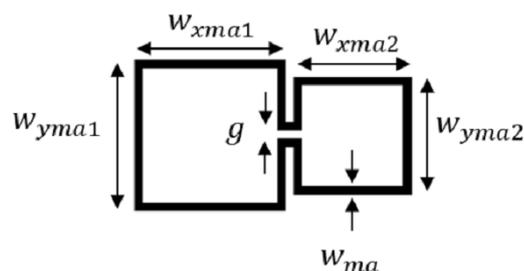
Figura 4 – Geometria Matrioska.



FONTE: (CRUZ, 2015)

O sensor aqui utilizado, foi introduzido em (GOMES NETO *et al.*, 2014). De maneira análoga, no primeiro momento é analisada uma microfita de largura w , em um substrato de permissividade relativa ϵ_r e espessura h . Logo após é projetado o anel matrioska a partir das medidas determinadas na Figura 5, e finalmente, o anel matrioska projetado é removido da camada de metalização do plano terra.

Figura 5 – Geometria Matrioska - Dimensões.



FONTE: (PATRICIO *et al.*, 2022)

Para o projeto é considerado por conveniência $w_{xma1} = w_{yma1} = w_{ma1}$ e $w_{xma2} = w_{yma2} = w_{ma2}$. Como abordados nos trabalhos de (FERREIRA, 2014) e (NETO *et al.*, 2015), para um estudo inicial, a frequência de ressonância considerando o sensor vazio, ou seja, o ar sendo o material de teste, Figura 3, pode ser calculada através da equação 3.1, sendo ϵ_{ref} conhecida na literatura como a constante dielétrica efetiva.

$$f_{res}(GHz) = \frac{0.3}{L_{efe}\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (3.1)$$

onde, L_{efe} e $w_{ma1-avg}$ são expressos pelas equações 3.2 e 3.3.

$$L_{efe} = 3 \times (w_{ma1-avg} + w_{ma2-avg}) \quad (3.2)$$

$$w_{ma1-avg} = w_{mai} - 0,5w_{ma}, i = 1, 2. \quad (3.3)$$

Uma vez que o sensor foi projetado, o material de teste é posto em contato com o DGS, e a partir dessa interação se faz possível a observação das alterações na frequência de ressonância do sensor. Neste TCC o material de teste é líquido, porém em diferentes concentrações de água destilada e sacarose. A partir variação da frequência de ressonância, pretende-se identificar o tipo de concentração utilizada para teste.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Este TCC tem como objetivo principal o estudo de um sensor de sacarose a partir em uma estrutura DGS baseada na geometria matrioska.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

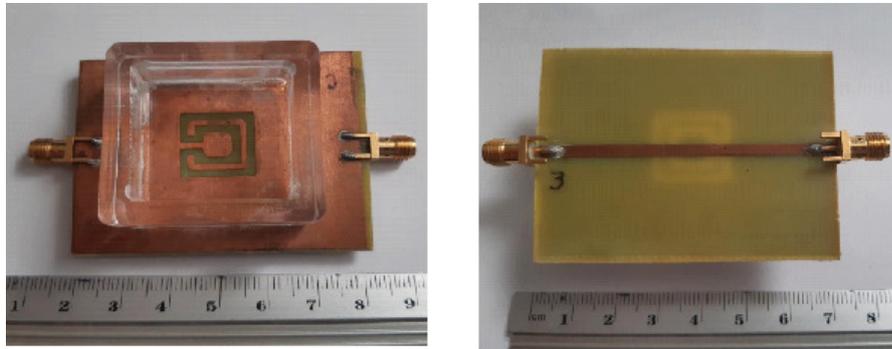
Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- i) Revisar a bibliografia correspondente a sensores;
- ii) Assimilar os conceitos principais da geometria matrioska;
- iii) Apresentar os princípios das estruturas DGS;
- iv) Construir uma estrutura DGS com geometria matrioska composta por dois anéis concêntricos interligados;
- v) Realizar simulações no sensor com as soluções de água destilada e sacarose;
- vi) Elaborar, a partir das medições com as diferentes concentrações da solução, a curva de calibração do sensor;
- vii) Produzir o TCC com base nos resultados alcançados.

5 RESULTADOS

Neste TCC, os resultados foram obtidos através de medições realizadas com um sensor DGS baseado na geometria Matrioska. O protótipo utilizado foi fabricado a partir de um substrato de FR4 ($\epsilon_r = 4,4$, $\tan(\theta)=0,02$, $h=1,6$ mm). A fim de criar uma estrutura capaz de receber as amostras da solução, foi fixado sobre uma célula de acrílico com 30 mm , 30 mm, 15 mm e centralizado em um laminado com largura de 8cm, Figura 6.

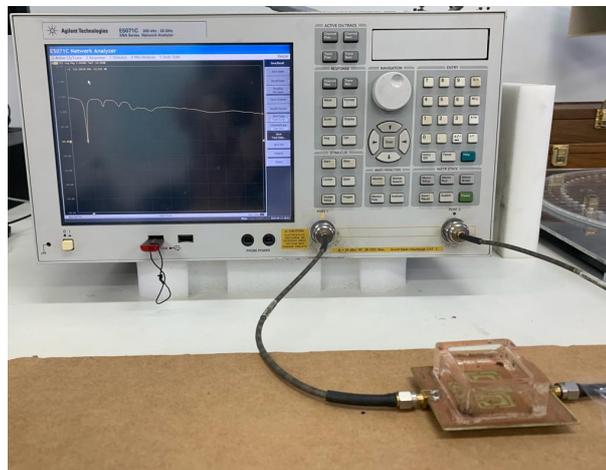
Figura 6 – Vista superior e inferior do protótipo utilizado nas medições.



FONTE: (PATRICIO *et al.*, 2022)

Para realizar as medições foi utilizado o Vector Network Analyzer Keysight E5071C, e o esquema utilizado pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Esquema de medição do sensor.



FONTE:Elaborado pelo autor.

A princípio, mediu-se o sensor somente preenchido de ar ($\epsilon_r = 1,0$). Na Figura

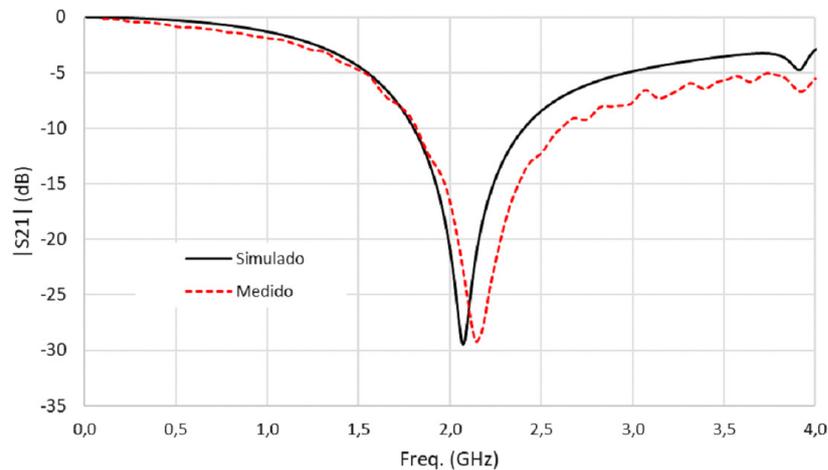
8 são expostos os resultados simulados e medidos, observando-se uma boa concordância. Assim como apresentado em (PATRICIO *et al.*, 2022) a frequência de ressonância obtida com a simulação foi de 2,07 GHz, uma diferença de aproximadamente 3,3% quando comparada ao valor medido, 2,14 GHz. Desse modo, reconheceu-se que os resultados simulados e medidos possuem uniformidade para a aplicação das equações 3.1, 3.2 e 3.3.

Tabela 1 – Valores medidos e simulados.

Simulado	Medido	Diferença (%)
2.07GHz	2,14GHz	3,3%

FONTE: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 8 – Sensor DGS preenchido de ar ($\epsilon_r = 1,0$).



FONTE: Elaborado pelo autor.

Com o intuito de produzir a mistura que foi utilizada durante as medições, dissolveu-se 80g de açúcar de confeitiro, aqui escolhido por possuir uma granulação bem fina, em 85g de água destilada, Figura 9, após a diluição obteve-se uma substância praticamente líquida e homogênea. Neste TCC esta solução será considerada como a referência para os valores da sacarose.

Figura 9 – Proporções utilizadas para elaboração da solução de sacarose.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Ao decorrer das medições foram consideradas onze soluções diferentes, de modo que, o primeiro teste da solução em contato com o sensor aconteceu com 100% da mistura de referência, ao segundo teste a solução foi composta por 90% de referência e 10% água destilada, nos testes posteriores utilizou-se a seguinte lógica: a mistura de referência decrescia 10% uma vez que a de água destilada era incrementada em 10%, sendo os testes executados até que a solução se tornasse 100% de água destilada. A Tabela 2 apresenta a concentração em cada um dos testes.

Tabela 2 – Percentuais durante os testes.

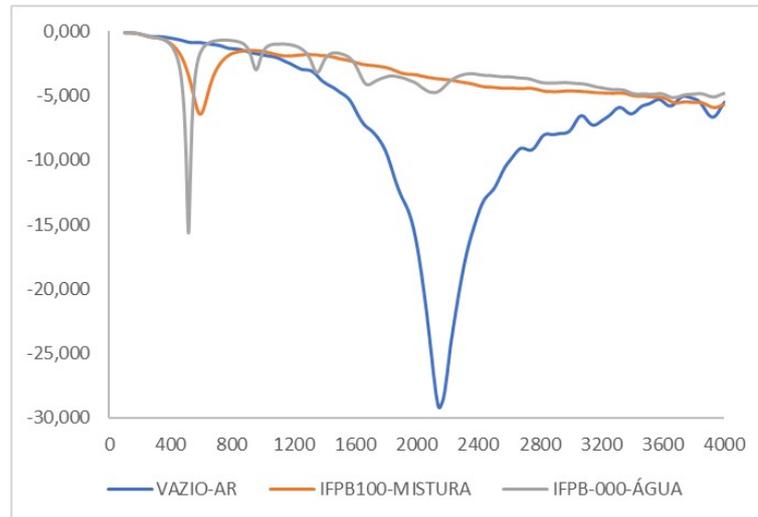
Teste	Água (%)	Mistura de referência (%)
1	0	0
2	0	100
2	10	90
4	20	80
5	30	70
6	40	60
7	50	50
8	60	40
9	70	30
10	80	20
11	90	10
12	100	0

FONTE: Elaborado pelo autor, 2022.

Na Figura 10 pode ser vista a resposta em frequência do sensor em três situações distintas: vazio, 100% mistura de referência, 100% água de água destilada, que correspondem aos testes 1, 2 e 12 como pode ser observado na Tabela 2. Tais resultados

apontam a faixa de frequência de operação do sensor DGS, de 500 MHz a 600 MHz.

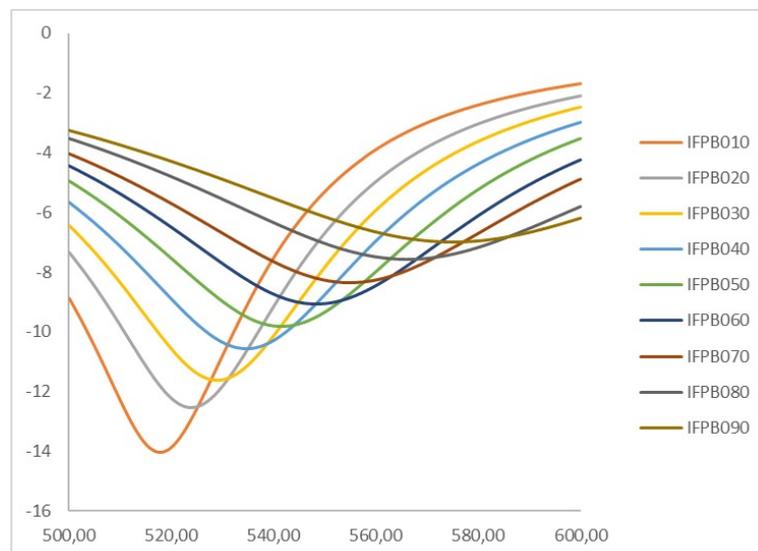
Figura 10 – Frequência de ressonância do sensor DGS para: vazio, 100% sacarose e 100% água de água destilada.



FONTE: Elaborado pelo autor.

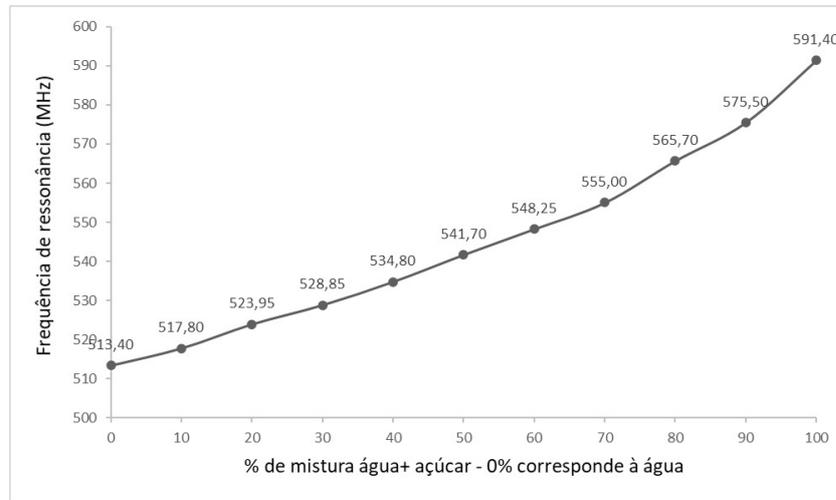
Note que, neste trabalho os testes são executados a fim de verificar se há alterações significativas na frequência de ressonância do sensor a medida que a solução em contato com o mesmo é modificada. Os resultados atingidos para a frequência de ressonância podem ser vistos na Figura 11. Com base nesses resultados obtém-se a curva de calibração do sensor aqui estudado, Figura 12.

Figura 11 – Resposta em frequência do sensor DGS para diferentes percentuais de sacarose e água destilada.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Curva de calibração do sensor DGS.

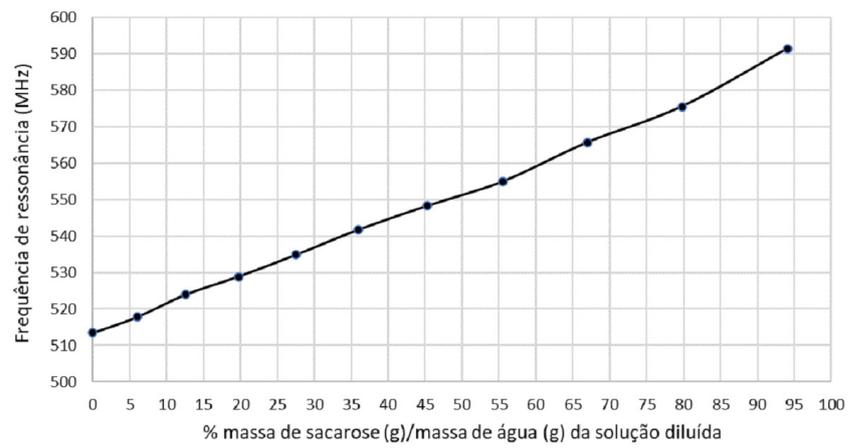


FONTE: Elaborado pelo autor.

Uma vez que a curva de calibração do sensor, não é linear, o percentual da sensibilidade do mecanismo varia de acordo com a concentração da solução utilizada durante os testes. A verificação dessa característica é realizada a partir da análise da Figura 10, de modo que, a curva de resposta em frequência apresenta respostas diferentes para as três situações a qual é submetido. Tal proposição é validada também a partir da observação da Figura 11, em que a curva de resposta em frequência varia de acordo com o percentual de concentração da solução.

Como desenvolvido em (PATRICIO *et al.*, 2022), ocorre a variação da frequência de ressonância em função da densidade de sacarose na solução diluída, isto é, o percentual da massa de sacarose em relação a massa total da solução diluída, Figura 13. Apresenta-se com base nos experimentos aqui descritos, uma capacidade de detecção de aproximadamente 6%.

Figura 13 – Resposta em frequência em função do percentual de sacarose na mistura.



FONTE: Elaborado pelo autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste TCC foi descrita a análise inicial de um sensor DGS baseado na geometria matrioska em contato com diferentes concentrações de diluição da sacarose em solução aquosa. Para este estudo, se fez a relação direta entre a variação da frequência de ressonância com a composição da solução em contato com o sensor. Em um ambiente experimental, onde ainda não há comprovação de elementos primordiais como: faixa de frequência ideal e largura de fita mais apropriada, o estudo obteve resultados satisfatórios, que viabilizam a utilização do sensor para este fim, incitando assim estudos futuros.

REFERÊNCIAS

- BOSCOLO, M. Sucroquímica: Síntese e potencialidades de aplicações de alguns derivados químicos de sacarose. **Quim. Nova**, v. 26, n. 6, p. 906–912, 2003.
- CONAB. **Nova estimativa de cana-de açúcar traz produção de 572,9 milhões de toneladas**. 2022. Disponível em: <[https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1172/1/CT_CPGEI_M_Reis%2c%20Diego%20Dias%20dos_2015.pdf](https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4725-nova-estimativa-de-cana-de-acucar-traz-producao-de-572-9-milhoes-toneladas#:~:text=De%20acordo%20com%20o%20levantamento,red%C3%A7%C3%A3o%20de%202%2C2%25.>></p>
<p>CRUZ, J. do N. Caracterização de FSS com geometria matrioska aberta. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, 2015.</p>
<p>FERREIRA, F. G. SISTEMAS COMPACTOS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO EM CAMPO PRÓXIMO USANDO ESTRUTURAS COM ABERTURA NO PLANO DE TERRA. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2021.</p>
<p>FERREIRA, H. de P. A. Matrioska: Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, 2014.</p>
<p>HADANO, F. S. Sensores Semicondutores polimétricos planares para detecção de amônia. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.</p>
<p>NETO, A. G.; JUNIOR, A. G. D.; SILVA, J. C. e; CRUZ, J. do N.; SILVA, J. B. de O.; RAMOS, N. J. P. de L. Multiband frequency selective surface with open matryoshka elements. Multiband frequency selective surface with open matryoshka elements, p. 1–5, 2015.</p>
<p>PATRICIO, M. da C. Z. B.; SANTOS, P. da S.; SILVA, J. C. e; CARVALHO, J. N. de; NETO, A. G. Determinação do Nível de Diluição de Sacarose em Solução Aquosa Utilizando um Sensor DGS Baseado na Geometria Matrioska. 2022.</p>
<p>REIS, D. D. dos. DESENVOLVIMENTO DE SENSORES PLANARES EM TECNOLOGIA DE CIRCUITOS IMPRESSOS PARA DETECÇÃO DE UMIDADE EM MADEIRAS E PRESENÇA DE ÁGUA EM DUTOS HIDRÁULICOS. 2015. Disponível em: <. Acesso em 15/08/2022.
- SENA, F. das Chagas Barbosa de. **Otimização de Estruturas DGS e PBG em Antenas de Microfita Retangular Usando Algoritmo Genético**. Dissertação (Mestrado) — Universidade federal do Rio grande do Norte, 2018.
- SILVA, O. B. D. **INVESTIGAÇÃO DE UM SENSOR DE UMIDADE DO SOLO USANDO ESTRUTURA DGS BASEADA NA GEOMETRIA MATRIOSKA**. 2022.
- WENDLING, M. **SENSORES**. 2010. Disponível em: <<https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em 15/08/2022.

7 ANEXO A - DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE DILUIÇÃO DE SACAROSE EM SOLUÇÃO AQUOSA UTILIZANDO UM SENSOR DGS BASEADO NA GEOMETRIA MATRIOSKA

Determinação do Nível de Diluição de Sacarose em Solução Aquosa Utilizando um Sensor DGS Baseado na Geometria Matrioska

Maria da Conceição Zelo Barbosa Patricio, Paloma da Silva Santos, Jefferson Costa e Silva, Joabson Nogueira de Carvalho, Alfrêdo Gomes Neto

Instituto Federal da Paraíba – IFPB - Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado - GTEMA
João Pessoa, Paraíba, Brasil, gtema.ifpb@gmail.com

Resumo—A sacarose é um dos mais importantes produtos do agronegócio brasileiro e, assim sendo, o desenvolvimento de sensores que possam monitorar o nível de diluição de sacarose torna-se bastante atrativo. Neste trabalho é apresentada a determinação do nível de diluição de sacarose em solução aquosa, utilizando um sensor DGS baseado na geometria matrioska. O procedimento de projeto do sensor DGS, incluindo as equações iniciais, é descrito. Um protótipo do sensor DGS foi fabricado e caracterizado numericamente e experimentalmente, confirmando a aplicabilidade das equações de projeto. Aplicado na determinação do nível de diluição de sacarose em solução aquosa, obteve-se a curva de calibração do sensor DGS, verificando-se que o mesmo foi capaz de determinar percentuais de até 6% de massa de sacarose por massa total de água, um resultado bastante promissor. Os resultados obtidos instigam outros grupos de pesquisa a se envolverem nesta linha de pesquisa.

Palavras-chaves—Sensor DGS; sensor de sacarose; sensor de micro-ondas; geometria matrioska.

I. INTRODUÇÃO

A sacarose, ou simplesmente açúcar, produzida a partir da cana-de-açúcar, é um dos principais produtos do agronegócio brasileiro. Sendo uma matéria-prima de fonte renovável e de baixo custo, a sacarose vem despertando o interesse da indústria química. Dada a sua importância, o segmento da química focado na síntese de derivados de açúcar passou a ser denominado como Sucoquímica [1], [2]. Assim sendo, o desenvolvimento de sensores que possam monitorar o nível de diluição de sacarose torna-se bastante atrativo [3]–[6]. Neste artigo é apresentada a aplicação de um sensor utilizando uma estrutura com defeito no plano terra, DGS (*Defected Ground Structure*), baseada na geometria matrioska, para determinação do nível de diluição de sacarose em uma solução aquosa. Dessa forma, procura-se aproveitar as características de miniaturização e seletividade da geometria matrioska, assim como a facilidade de fabricação e o baixo custo das DGSs.

Este trabalho é apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Chamada CNPq N° 04/2021) e pelo IFPB (Edital 27/2021-PIBITI/CNPq, Chamada Interconecta IFPB - N° 01/2022) e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba (PPGEE-IFPB).

Para verificar a viabilidade da aplicação do sensor DGS proposto, um protótipo foi projetado, fabricado e caracterizado numericamente e experimentalmente. Na sequência, o sensor DGS foi aplicado em uma solução aquosa de sacarose com diferentes níveis de diluição, tendo sido levantada a sua curva de calibração. Verificou-se que o sensor DGS foi capaz de determinar níveis de até 6% de massa de sacarose em relação à massa de água da solução diluída. Este artigo está organizado da seguinte forma: após esta introdução, na Seção II é descrito o sensor DGS baseado na geometria matrioska, incluindo as equações de projeto; na Seção III são apresentados os procedimentos numéricos e experimentais, assim como os resultados obtidos; Conclusões são apresentadas na Seção IV.

II. SENSOR DGS BASEADO NA GEOMETRIA MATRIOSKA

Uma DGS é formada a partir da remoção de parte do plano terra de uma estrutura planar, como, por exemplo, uma microfita, Fig. 1, [7]–[9]. Basicamente, o sensor é obtido colocando-se o material em teste, MUT (*Material Under Test*), na região da DGS, Fig. 2. A interação do MUT com os campos eletromagnéticos pode alterar a resposta em frequência da DGS e essa alteração pode ser utilizada para detectar características do MUT, obtendo-se assim o sensor DGS.

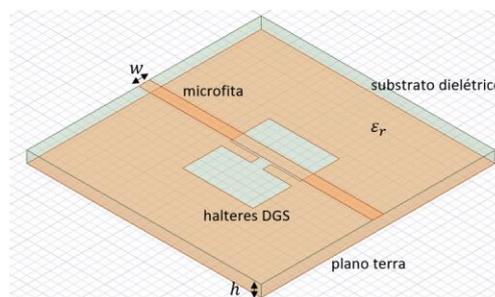


Fig. 1. Exemplo de DGS – Geometria halteres.

No projeto de uma DGS a escolha da geometria é um dos parâmetros mais flexíveis, sendo possível, por meio da geometria adequada, ajustar a sua resposta em frequência. Apesar da variedade de geometrias DGSs (cabeça em espiral, ponta de flecha, ranhuras em forma de H, halteres etc.) [8], [9], a evolução contínua da indústria de sensores, com um número aparentemente infinito de sensores sendo incorporados em dispositivos sem fio, requer novas geometrias.

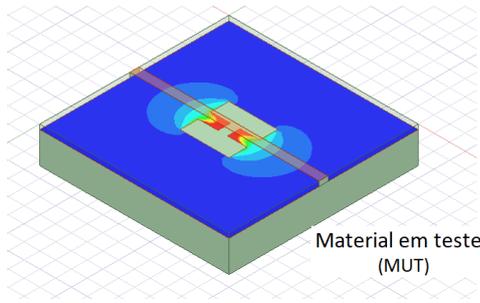


Fig. 2. Sensor DGS – Geometria halteres.

A geometria matrioska foi introduzida em [10], [11], tendo características como miniaturização e operação multibanda. Mais recentemente, essa geometria foi aplicada em filtros DGS [12] e, quando comparada à geometria halteres, apresentou menores dimensões e maior seletividade, o que a torna bastante atrativa para aplicações em sensores. Essencialmente, a geometria matrioska é obtida a partir da interligação de dois ou mais anéis concêntricos, Fig. 3. Essa interligação permite o aumento do seu comprimento efetivo, porém, limitando a área ocupada à área do anel mais externo, Fig. 4.

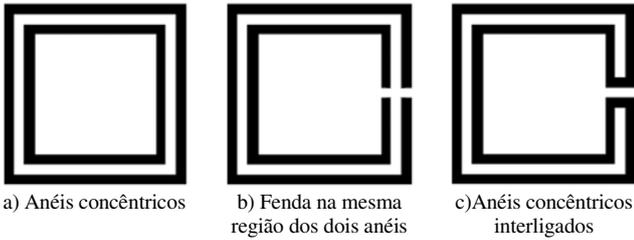


Fig. 3. Obtenção da geometria matrioska.

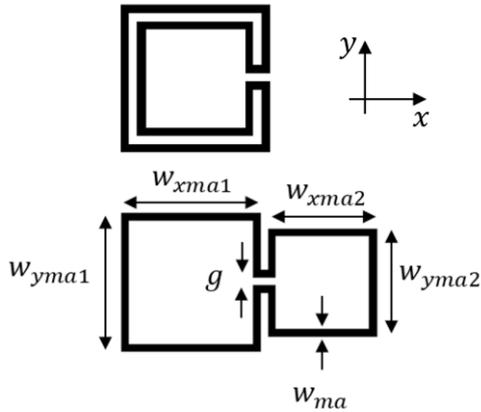


Fig. 4. Anel matrioska expandido.

O sensor DGS baseado na geometria matrioska é obtido removendo o anel matrioska da camada de metalização do plano terra, Fig. 5. Note que, para facilitar a visualização, na Fig. 5 não foi colocado o MUT.

Em geral, $w_{xma1} = w_{yma1} = w_{ma1}$ e $w_{xma2} = w_{yma2} = w_{ma2}$. Considerando o sensor DGS sem o MUT, como uma primeira aproximação, a frequência de ressonância pode ser calculada por [12]:

$$f_{res}(GHz) = \frac{0,3}{L_{efe}\sqrt{\epsilon_{refe}}}, \quad (1)$$

com,

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

e

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

ϵ_{refe} é a constante dielétrica efetiva para uma microfita com largura w , sobre um substrato de espessura h e constante dielétrica ϵ_r .

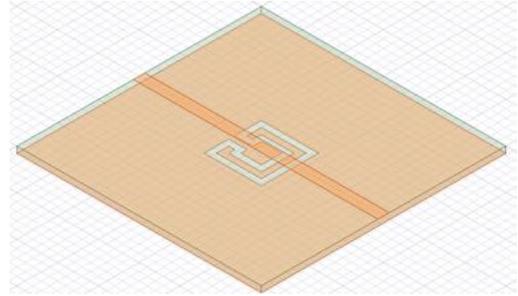


Fig. 5. Sensor DGS baseado na geometria matrioska.

Embora possa ser utilizado um maior número de anéis, neste trabalho são considerados apenas dois anéis concêntricos, o que corresponde a um anel matrioska.

III. PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS E RESULTADOS OBTIDOS

Para avaliar a aplicação do sensor DGS proposto, foi fabricado um protótipo utilizando um substrato de FR4 ($\epsilon_r = 4,4$, $\tan(\delta) = 0,02$, $h = 1,6 \text{ mm}$), com as dimensões apresentadas na Tabela I. Para que o MUT pudesse ser colocado sobre a região da DGS, foi fixada uma célula de medição em acrílico, com $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, conforme apresentado na Fig. 6. Os resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA-IFPB, sendo o sensor DGS conectado a um VNA Agilent E5071C [13], Fig. 7. Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o programa computacional ANSYS Electronics Desktop [14].

TABELA I – DIMENSÕES DO SENSOR DGS

w_{ma1}	w_{ma2}	w_{ma}	g	w
17,0 mm	11,0 mm	1,5 mm	1,0 mm	2,8 mm

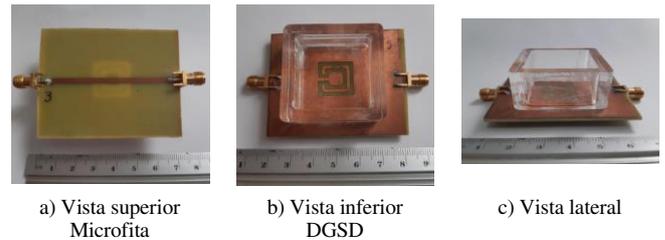


Fig. 6. Protótipo do sensor DGS baseado na geometria matrioska.

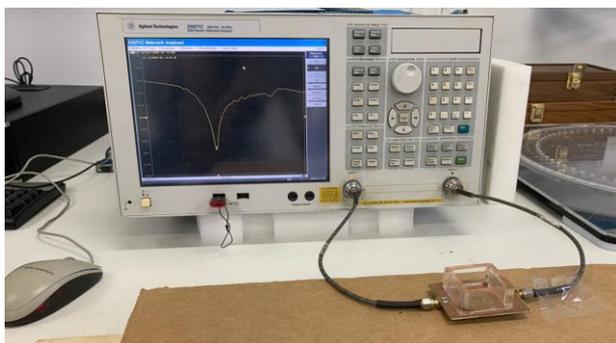


Fig. 7. Configuração para medição usando o sensor DGS proposto.

Inicialmente, o sensor DGS foi caracterizado considerando que a célula de medição está vazia, ou seja, preenchida com ar ($\epsilon_r = 1,0$). Na Fig. 8 são apresentados os resultados simulados e medidos, observando-se uma boa concordância. A frequência de ressonância obtida com a simulação foi de $2,07\text{ GHz}$, uma diferença de aproximadamente $3,3\%$ quando comparada ao valor medido, $2,14\text{ GHz}$. Por outro lado, para $\epsilon_{refe} = 3,32$, determinado usando o programa APPCAD, [15], com as equações (1)–(3), a frequência de ressonância calculada foi de $2,07\text{ GHz}$, o mesmo valor obtido numericamente. Portanto, além da boa concordância entre os resultados simulados e medidos, constatou-se a aplicabilidade das equações (1)–(3) no projeto do sensor DGS proposto.

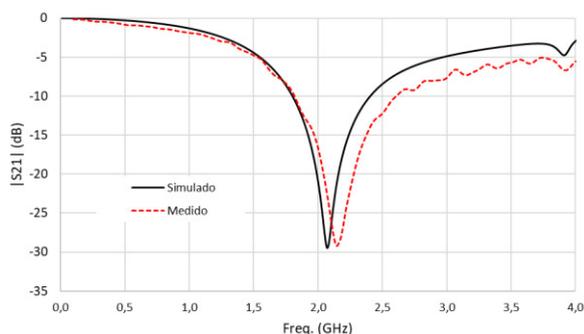


Fig. 8. $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$ – Sensor DGS proposto vazio.

A próxima etapa do procedimento experimental consistiu em dissolver 80 g de açúcar em pó, também conhecido como açúcar de confeitado, em 85 g de água destilada, Fig. 9. Tratando-se de um açúcar com uma granulação bastante fina, após agitada, obteve-se uma solução praticamente líquida e homogênea, apresentando uma densidade de $1,2\text{ g/cm}^3$. Ressalte-se que essa solução será considerada como a referência para os valores da sacarose, ou seja, ao ser considerado 100% da solução, refere-se a 80 g de açúcar dissolvidos em 85 g de água, ou seja, aproximadamente $48,48\%$ de sacarose e $51,52\%$ de água, ou $0,94\text{ g}_{sacarose}/\text{g}_{\text{água}}$. Em seguida, a solução foi diluída com água destilada, em percentuais de 10% . Neste caso, por exemplo, com 90% (9 cm^3) da solução e 10% (1 cm^3) de água destilada, obtém-se:

$$\text{massa}_{\text{solução de referência}} = 1,2 \times 9 = 10,8\text{ g} \quad (4)$$

$$\text{massa}_{sacarose} = 10,8 \times 0,4848 = 5,24\text{ g}_{sacarose} \quad (5)$$

$$\text{massa}_{\text{água}} = 10,8 \times 0,5152 + 1,0 = 6,56\text{ g}_{\text{água}} \quad (6)$$

$$\text{massa}_{sacarose}/\text{massa}_{\text{água}} = 0,80\text{ g}_{sacarose}/\text{g}_{\text{água}} \quad (7)$$



a) Açúcar em pó

b) Água destilada

Fig. 9. Ingredientes utilizados no preparo da solução de referência.

Na Fig. 10 é apresentada a resposta em frequência do sensor DGS considerando três situações: vazio, 100% solução de referência, 100% água. Esses resultados indicam a faixa de frequência de operação do sensor DGS, de 500 MHz a 600 MHz .

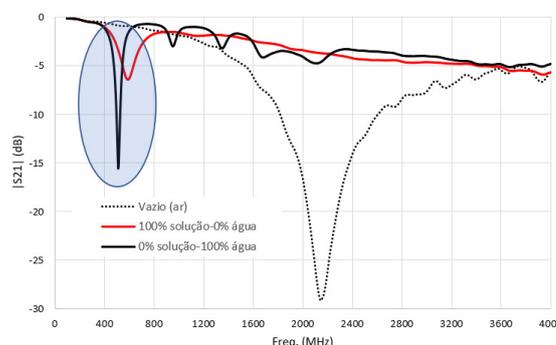


Fig. 10. $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (MHz)}$ – Resposta em frequência do sensor DGS para situações-limite.

As respostas em frequência para diferentes percentuais de solução e água destilada são apresentadas na Fig. 11. A partir desses resultados obtém-se a curva de calibração do sensor DGS proposto, apresentada na Fig. 12. Outra maneira de apresentar esse resultado é colocando a frequência de ressonância em função da concentração de sacarose na solução diluída, ou seja, o percentual da massa de sacarose em relação à massa total da solução diluída, Fig. 13. Nota-se que neste caso o sensor foi capaz de identificar percentuais de até 6% .

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a aplicação de um sensor DGS baseado na geometria matrioska para determinação da diluição da sacarose em solução aquosa. Os procedimentos de projeto foram descritos e as equações iniciais de projeto apresentadas. Foi fabricado um protótipo e a sua caracterização numérica e experimental confirmou a aplicabilidade das equações de projeto propostas.

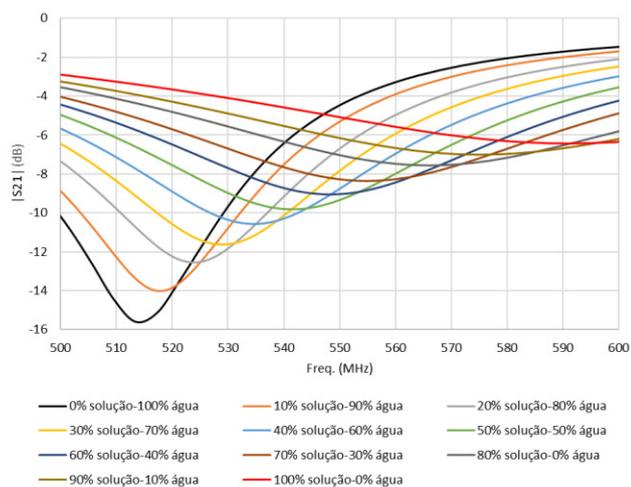


Fig. 11. $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$ – Resposta em frequência do sensor DGS para diferentes percentuais de solução e água destilada.

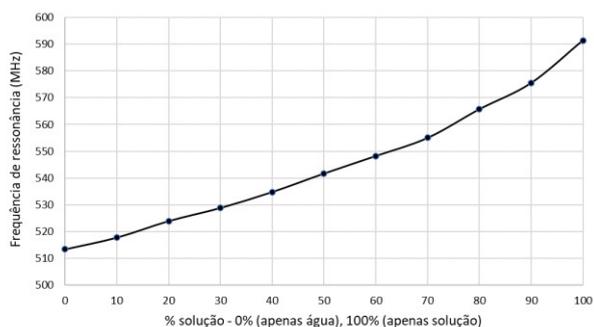


Fig. 12. Curva de calibração do sensor DGS.

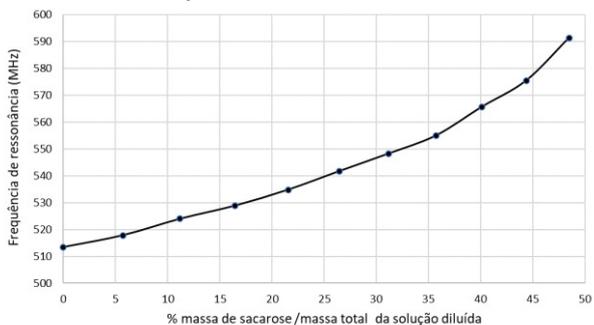


Fig. 13. Resposta do sensor DGS em função da concentração de sacarose.

Foi utilizada uma solução de sacarose e água e o sensor DGS foi capaz de identificar percentuais de até 6% de massa de sacarose por massa total de água, o que é um resultado bastante interessante. Vale destacar que esse foi uma primeira investigação e várias questões permanecem em aberto. Qual a faixa de frequência ideal? Qual deve ser o número de anéis matrioska? Qual a largura da fita (w) mais adequada? Essas são apenas algumas questões que instigam novas pesquisas.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Boscolo, "Sucroquímica: síntese e potencialidades de aplicações de alguns derivados químicos de sacarose," *in Química Nova*, vol. 26, no. 6, pp. 906-912, 2003, doi: 10.1590/S0100-40422003000600021.
- [2] V. F. Ferreira, D. R. da Rocha, F. de C. da Silva, "Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares," *in Química Nova*, vol. 32, no. 3, pp. 623-638, 2009, doi: 10.1590/S0100-40422009000300007.
- [3] C. Luo, R. Fernández-García and I. Gil, "Embroidered textile capacitive sensor for sucrose solutions measurement," *2020 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS)*, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/FLEPS49123.2020.9239432.
- [4] A. L. Kukla, M. I. Kanyuk and S. S. Nagorna, "Multibiosensor on the basis of Yeast cells for detection of glucose and sucrose in aqueous solutions," *TRANSDUCERS 2007 - 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, 2007, pp. 1899-1902, doi: 10.1109/SENSOR.2007.4300529.
- [5] J. -Y. Lu and C. -H. Tseng, "Permittivity measurement of sucrose solution using complementary split-ring resonator sensor," *2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2020, pp. 486-488, doi: 10.1109/APMC47863.2020.9331388.
- [6] H. Landari, A. Jobin-Rioux, L. -C. Desjardins, Y. Messaddeq, É. Boisselier and A. Miled, "Spectrophotometry method for sucrose detection through glucose quantification in maple syrup," *2019 IEEE SENSORS*, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956912.
- [7] D. F. Mamedes, A. G. Neto, J. Bornemann, J. C. e Silva and F. A. Teixeira Abreu, "A Sensor Using a Matryoshka Geometry Defected Ground Structure," *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2022, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9768950.
- [8] M. K. Khandelwal, B. K. Kanaujia, and S. Kumar, "Defected ground structure: Fundamentals, analysis, and applications in modern wireless trends," *Hindawi Int. J. Antennas Propagat.*, vol. 2017, Article ID 2018527, <https://doi.org/10.1155/2017/2018527>.
- [9] L. H. Weng, Y. C. Guo, X. W. Shi, and X. Q. Chen, "An overview on defected ground structure," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 7, pp. 173-189, 2008. doi:10.2528/PIERB08031401.
- [10] A. Gomes Neto, A. G. DAssunção, J. C. e Silva, A. N. da Silva, H. d. P. A. Ferreira, and I. S. S. Lima, "A proposed geometry for multi-resonant frequency selective surfaces," *Proc. 44th European Microwave Conference*, Rome, Italy, 2014, pp. 897-900. doi: 10.1109/EuMC.2014.6986580.
- [11] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, J. N. de Carvalho, J. do N. Cruz, and H. de P. A. Ferreira, "Analysis of the resonant behavior of FSS using Matryoshka geometry," *Proc. 2015 SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. and Optoelectron. Conf. (IMOC)*, Porto de Galinhas, Brazil, Nov. 2015, pp. 1-5.
- [12] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, I. B. G. Coutinho, S. S. Camilo Filho, D. A. Santos, B. L. C. de Albuquerque, "A defected ground structure based on matryoshka geometry," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*, vol. 21, no. 2, June 2022, <https://doi.org/10.1590/2179-10742022v21i2256115>
- [13] <https://www.keysight.com/br/pt/product/E5071C/e5071c-ena-vector-network-analyzer.html>.
- [14] <http://www.ansys.com>.
- [15] <http://www.hp.woodshot.com>.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, Joao Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de conclusão de curso com ficha catalográfica

Assunto:	Trabalho de conclusão de curso com ficha catalográfica
Assinado por:	Paloma Santos
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Paloma da Silva Santos, ALUNO (20162610026) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA, em 27/12/2023 13:41:34.

Este documento foi armazenado no SUAP em 27/12/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1039457

Código de Autenticação: e74c8e4d9e

