



Francisco Aldir Teixeira Abreu

GEOMETRIA MATRIOSKA APLICADA EM SENSOR DGS

Orientador: Jefferson Costa e Silva, Dr.

Coorientador: Alfrêdo Gomes Neto, Dr.

João Pessoa - PB
2023

Francisco Aldir Teixeira Abreu

GEOMETRIA MATRIOSKA APLICADA EM SENSOR DGS

Dissertação de Mestrado submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Costa e Silva

Coorientador: Prof. Dr. Alfrêdo Gomes Neto

João Pessoa – PB
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

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

A162g

Abreu, Francisco Aldir Teixeira.

Geometria matrioska aplicada em sensor DGS / Francisco Aldir Teixeira Abreu. – 2023.

66 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba – IFPB / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2023.

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

Coorientação : Prof. D.r Alfrêdo Gomes Neto.

1.Sensor DGS. 2. Geometria matrioska. 3.Miniaturização.
4. Seletividade. I. Título.

CDU 621.382(043)

Catálogo: Lucrecia Camilo de Lima – Bibliotecária CRB 15/132

GEOMETRIA MATRIOSKA APLICADA EM SENSOR DGS

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência eTecnologia da Paraíba – IFPB - Campus João Pessoa.

Aprovado em 22 de maio de 2023.

Membros da Banca Examinadora:

Dr. Jefferson Costa e Silva
IFPB – PPGEE

Dr. Alfredo Gomes Neto
IFPB - PPGEE

Dr. Joabson Nogueira de Carvalho
IFPB – PPGEE

Dr. Gustavo Araujo Cavalcante
IFPB – PPGEE

Dr. Valdemir Praxedes da Silva Neto
UFRN

Documento assinado eletronicamente por:

- Jefferson Costa e Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/05/2023 11:25:40.
- Alfredo Gomes Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/05/2023 11:28:15.
- Valdemir Praxedes da Silva Neto, PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL, em 22/05/2023 21:39:24.
- Joabson Nogueira de Carvalho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 23/05/2023 09:17:23.
- Gustavo Araujo Cavalcante, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 23/05/2023 16:32:44.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/04/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 418824
Verificador: 1a540aab1
Código de Autenticação:



Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, JOAO PESSOA / PB, CEP 58015-435
<http://ifpb.edu.br> - (83) 3612-1200

João Pessoa/2023

DEDICATÓRIA

Ao Senhor Deus, por tudo que alcancei até hoje. À minha família, por sempre estarem comigo e reconhecerem meus esforços, mostrando que meus erros me ajudam a crescer.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Aos professores Jefferson e Alfredo, por terem sido meus orientadores e terem desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Aos professores do PPGEE, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

A todos do GTEMA, pelo fornecimento de dados e materiais que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa que possibilitou a realização deste trabalho.

Aos familiares, por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos gigantes.”

Isaac Newton

RESUMO

A geometria matrioska foi aplicada em sensores DGS (*Defected Ground Structure*). A ideia é aproveitar as características de miniaturização e a seletividade da geometria matrioska. Misturas de água destilada e álcool isopropílico foram caracterizados para verificar a sensibilidade dos sensores. O funcionamento dos sensores depende do ambiente em que são instalados, pois ao receber o estímulo a que foram programados, não havendo interferência, emitem um sinal que é capaz de ser interpretado por outros dispositivos. Um dos desafios tecnológicos é o desenvolvimento de sensores que possam ser integrados aos sistemas de telecomunicações. Neste contexto, é investigado o desenvolvimento de sensores baseados na tecnologia DGS, utilizando a geometria matrioska, para obter um sensor com dimensões menores e maior seletividade, quando comparado com outras geometrias. Neste trabalho, os sensores são avaliados dentro de uma faixa de frequência de interesse. As simulações numéricas e caracterizações experimentais foram realizadas em duas etapas. Na primeira é considerada apenas uma geometria de sensor DGS-matrioska, sendo esse comparado com sensores na geometria haltere. Na segunda parte são consideradas diferentes configurações de sensores DGS-matrioska, levando-se em conta resultados numéricos e experimentais. De maneira geral, os sensores desenvolvidos, seus resultados numéricos e experimentais apresentaram boa concordância. As equações iniciais de projeto propostas apresentaram resultados satisfatórios, quando comparado os valores obtidos nas medições. Os sensores com anel aberto conseguiram detectar todos os níveis de água destilada na mistura, enquanto os sensores com anel fechado detectaram teor a partir de 20% de água destilada.

Palavras-chave: sensor, DGS, geometria matrioska, miniaturização, seletividade.

ABSTRACT

The matrioska geometry was applied in DGS sensors (Defected Ground Structure). The idea is to take advantage of the miniaturization characteristics and selectivity of matrioska geometry. Mixtures of distilled water and isopropyl alcohol were characterized to verify the sensitivity of the sensors. The functioning of the sensors depends on the environment in which they are installed, because when receiving the stimulus to which they were programmed, with no interference, they emit a signal that is capable of being interpreted by other devices. One of the technological challenges is the development of sensors that can be integrated into telecommunications systems. In this context, the development of sensors based on DGS technology, using matrioska geometry, is investigated to obtain a sensor with smaller dimensions and greater selectivity, when compared to other geometries. In this work, the sensors are evaluated within a frequency range of interest. Numerical simulations and experimental characterizations were carried out in two stages. In the first one, only a DGS-matrioska sensor geometry is considered, which is compared with sensors in the dumbbell geometry. In the second part, different configurations of DGS-matrioska sensors are considered, taking into account numerical and experimental results. In general, the sensors developed, their numerical and experimental results showed good agreement. The proposed initial design equations presented satisfactory results, when compared to the values obtained in the measurements. The sensors with an open ring were able to detect all levels of distilled water in the mixture, while the sensors with a closed ring detected content from 20% of distilled water.

Keywords: sensor, DGS, matrioska geometry, miniaturization, selectivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sensores.	18
Figura 2 – Estrutura DGS – Geometria haltere.	19
Figura 3 – Sensor DGS – Geometria haltere.	20
Figura 4 – Exemplos de Geometrias DGSs.	21
Figura 5 – Geometria matrioska passo a passo.	23
Figura 6 – Geometria matrioska – Dimensões.	24
Figura 7 – Sensor DGS – Geometria matrioska.	25
Figura 8 – Sensor DGS – Geometria matrioska - anel aberto.	25
Figura 9 – Parâmetros utilizados na avaliação do sensor.	26
Figura 10 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensor DGS matrioska vazio, $w_{\text{ma1}} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{\text{ma2}} = 9,5 \text{ mm}$.	28
Figura 11 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensor DGS haltere vazio, $a = 15,5 \text{ mm}$, $b = 6,25 \text{ mm}$, $g_d = 1,5 \text{ mm}$.	28
Figura 12 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensor DGS haltere vazio, $a = 30,0 \text{ mm}$, $b = 13,6 \text{ mm}$, $g_d = 1,5 \text{ mm}$.	29
Figura 13 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensores vazios.	29
Figura 14 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensor DGS matrioska com água destilada, $w_{\text{ma1}} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{\text{ma2}} = 9,5 \text{ mm}$.	30
Figura 15 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensor DGS haltere com água destilada, $a = 15,5 \text{ mm}$, $b = 6,25 \text{ mm}$, $g_d = 1,5 \text{ mm}$.	30
Figura 16 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensor DGS haltere com água destilada, $a = 30,0 \text{ mm}$, $b = 13,6 \text{ mm}$, $g_d = 1,5 \text{ mm}$.	31
Figura 17 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensores com água destilada.	31
Figura 18 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensor DGS matrioska com álcool isopropílico, $w_{\text{ma1}} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{\text{ma2}} = 9,5 \text{ mm}$	32
Figura 19 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensor DGS haltere com álcool isopropílico, $a = 15,5 \text{ mm}$, $b = 6,25 \text{ mm}$, $g_d = 1,5 \text{ mm}$.	32
Figura 20 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensor DGS haltere com álcool isopropílico, $a = 30,0 \text{ mm}$, $b = 13,6 \text{ mm}$, $g_d = 1,5 \text{ mm}$.	32
Figura 21 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensores com álcool isopropílico	33
Figura 22 – Configuração utilizada para realização das medições.	34
Figura 23 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq.}(\text{GHz})$, sensor DGS matrioska 1 vazio, $w_{\text{ma1}} =$ $17,0 \text{ mm}$, $w_{\text{ma}} = 1,5 \text{ mm}$.	36

Figura 24 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 1 com 100% água e 100% álcool.	37
Figura 25 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 1 com 100% água e 100% álcool.	37
Figura 26 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 1 com mistura líquida.	38
Figura 27 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 1 com mistura líquida.	38
Figura 28 – Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 1.	38
Figura 29 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 2 vazio, $w_{\text{ma}1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{\text{ma}} = 1,5 \text{ mm}$.	39
Figura 30 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 2 com 100% água e 100% álcool.	40
Figura 31 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 2 com 100% água e 100% álcool.	40
Figura 32 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 2 com mistura líquida	41
Figura 33 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 2 com mistura líquida	41
Figura 34 – Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 2.	41
Figura 35 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 3 vazio, $w_{\text{ma}1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{\text{ma}} = 1,0 \text{ mm}$.	42
Figura 36 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 3 com 100% água e 100% álcool.	43
Figura 37 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 3 com 100% água e 100% álcool.	43
Figura 38 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 3 com mistura líquida.	44
Figura 39 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 3 com mistura líquida.	44
Figura 40 – Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 3.	44
Figura 41 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 4 vazio, $w_{\text{ma}1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{\text{ma}} = 2,0 \text{ mm}$.	45
Figura 42 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 4 com 100% água e 100% álcool.	46
Figura 43 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 4 com 100% água e 100% álcool.	46
Figura 44 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 4 com mistura líquida.	47
Figura 45 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 4 com mistura líquida.	47
Figura 46 – Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 4.	47

Figura 47 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 5 vazio, $w_{\text{ma}1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{\text{ma}} = 1,5 \text{ mm}$, aberto.	48
Figura 48 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 5 com 100% água e 100% álcool	49
Figura 49 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 5 com 100% água e 100% álcool	49
Figura 50 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 5 com mistura líquida.	50
Figura 51 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 5 com mistura líquida.	50
Figura 52 – Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 5.	50
Figura 53 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 6 vazio, $w_{\text{ma}1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{\text{ma}} = 1,0 \text{ mm}$, aberto.	51
Figura 54 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 6 com 100% água e 100% álcool	52
Figura 55 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 6 com 100% água e 100% álcool	52
Figura 56 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 6 com mistura líquida.	53
Figura 57 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 6 com mistura líquida.	53
Figura 58 – Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 6.	53
Figura 59 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 7 vazio, $w_{\text{ma}1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{\text{ma}} = 2,0 \text{ mm}$, aberto.	54
Figura 60 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 7 com 100% água e 100% álcool.	55
Figura 61 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 7 com 100% água e 100% álcool.	55
Figura 62 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 7 com mistura líquida.	56
Figura 63 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 7 com mistura líquida.	56
Figura 64 – Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 7.	56
Figura 65 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 8 vazio, $w_{\text{ma}1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{\text{ma}} = 2,0 \text{ mm}$. Verificar esa informação.	57
Figura 66 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 8 com 100% água e 100% álcool.	58
Figura 67 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 8 com 100% água e 100% álcool.	58
Figura 68 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 8 com mistura líquida.	59
Figura 69 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 8 com mistura líquida.	59
Figura 70 – Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 8.	59

Figura 71 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 9 vazio, $w_{\text{ma}1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{\text{ma}} = 1,0 \text{ mm}$, aberto	60
Figura 72 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 9 com 100% água e 100% álcool.	61
Figura 73 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 9 com 100% água e 100% álcool.	61
Figura 74 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 9 com mistura líquida.	62
Figura 75 – $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 9 com mistura líquida.	62
Figura 76 – Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 9.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Dimensões DGSM (DGS matrioska) e DGSB (haltere)	33
Tabela II – Frequências ressonantes dos sensores DGSs	33
Tabela III – Largura de banda (<i>BW</i>) - Matrioska x Haltere	34
Tabela IV – Dimensões dos sensores DGS-matrioska	35
Tabela V – Frequências Ressonantes do Sensor 1	37
Tabela VI – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 1	39
Tabela VII – Frequências Ressonantes do Sensor DGS-matrioska 2	40
Tabela VIII – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 2	42
Tabela IX – Frequências Ressonantes do Sensor DGS-matrioska 3	43
Tabela X – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 3	45
Tabela XI – Frequências Ressonantes do Sensor 4	46
Tabela XII – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 4	48
Tabela XIII – Frequências Ressonantes do Sensor 5	49
Tabela XIV – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 5	51
Tabela XV – Frequências Ressonantes do Sensor 6	52
Tabela XVI – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 6	54
Tabela XVII – Frequências Ressonantes do Sensor 7	55
Tabela XVIII – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 7	57
Tabela XIX – Frequências Ressonantes do Sensor 8	58
Tabela XX – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 8	60
Tabela XXI – Frequências Ressonantes do Sensor 9	61
Tabela XXII – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 9	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IoT	<i>Internet of Things</i>
DGS	<i>Defected Ground Structures</i>
MUT	<i>Material under test</i>
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i>
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
BW	<i>Band Width</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

w_{ma1}	dimensão do anel matrioska externo
w_{ma2}	dimensão do anel matrioska interno
w_{ma}	largura da fita dos anéis
g	largura da fenda
f_{res}	frequência de ressonância
ϵ_{refe}	permissividade elétrica relativa efetiva para a linha de microfita
L_{efe}	comprimento efetivo do anel matrioska
w	largura da microfita
h_t	espessura do substrato
ϵ_r	permissividade elétrica relativa
f_{c1}	Frequência de corte 1
f_{c2}	Frequência de corte 2
Q	Fator de qualidade
Q_A	Fator de atenuação
$A_{f_{res}}$	Atenuação na frequência de ressonância

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Objetivos	21
1.1.1. Objetivo geral	21
1.1.2. Objetivos específicos	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1. Geometria matrioska	23
2.2. Parâmetros de avaliação dos sensores	26
3. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS	27
3.1 Comparação do sensor DGS-matrioska com a geometria haltere	27
3.2 Resultados experimentais para diferentes configurações do sensor DGS-matrioska	34
4. CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

A popularização da Internet, aliada ao avanço da tecnologia, aumentou drasticamente os níveis de conectividade dos produtos. Eletrodomésticos (geladeiras, fornos de micro-ondas, máquinas de lavar roupa etc.), dispositivos de segurança (câmeras, sensores de presença, sensores de fumaça etc.) e eletroportáteis (relógios inteligentes, smartphones etc.) são apenas alguns exemplos de dispositivos que possuem a opção de estarem conectados a uma rede de comunicação, em geral em sistemas de comunicação sem fio. Para atender tal crescimento de demanda, vários tipos de sensores têm sido desenvolvidos para aplicações em indústrias, comércios e até mesmo em residências. Dessa maneira, a utilização de sensores tem favorecido o avanço da automação dos diversos processos que compõem a atividades humana, desde os processos industriais, até o monitoramento dos parâmetros de saúde. Os sensores desempenham um papel fundamental, medindo e monitorando parâmetros (movimento, temperatura, pressão etc.) do local onde é instalado [1].

Os sensores são equipamentos capazes de detectar ações ou estímulos externos (calor, pressão, movimento, luz etc.) e transformar em sinal passível de ser registrado, transformando as grandezas físicas ou químicas em outros tipos de grandezas [2]. O funcionamento dos sensores depende do ambiente em que são instalados, pois ao receber o estímulo a que foram programados, não havendo interferência, emitem um sinal que é capaz de ser interpretado por outros dispositivos. Na Figura 1 são mostrados exemplos de sensores.

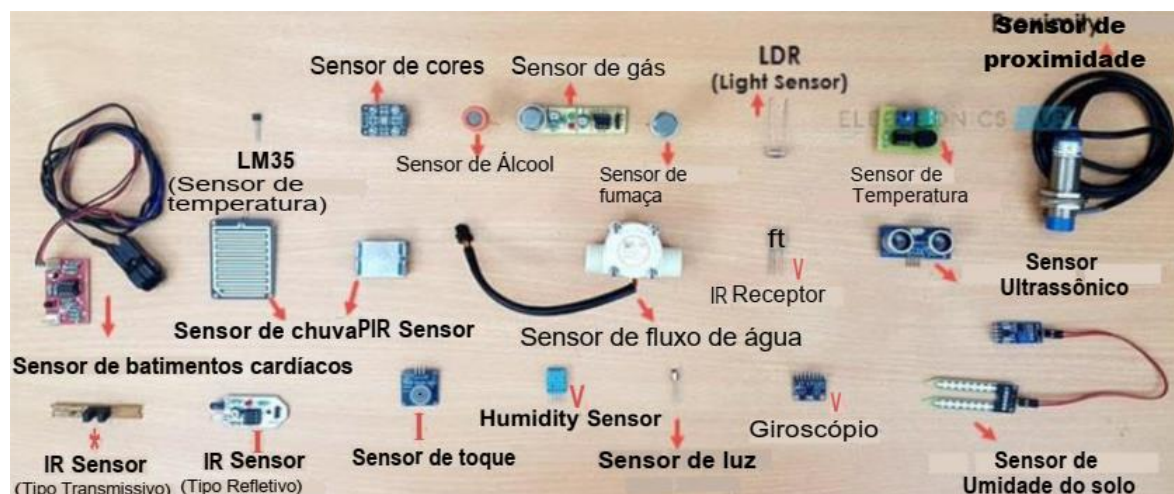


Fig. 1 – Sensores, [3].

Há uma grande variedade de sensores e aplicações. Por isso, esse é um dos segmentos da tecnologia dos dispositivos que mais vem crescendo [4]. O crescimento e desenvolvimento

da IoT (*Internet of Things*) e a convergência digital são alguns dos exemplos de aplicações onde esses dispositivos podem ser utilizados. O aumento no consumo de produtos eletrônicos, o uso de múltiplos sensores em *smartphones*, o surgimento da indústria 4.0 (que foi uma concepção criada para designar a ação da IoT e suas implicações nas metodologias de produção), a indústria automotiva e a demanda por dispositivos vestíveis (um grupo de dispositivos móveis projetados para serem utilizados como acessórios ou ao longo do dia), são algumas das forças motrizes do mercado de sensores [5].

A busca pelo equilíbrio entre rapidez e qualidade em um mundo cada vez mais globalizado elevou a dependência da tecnologia de telecomunicações a um nível em que, praticamente, não se concebe várias das atividades do dia a dia sem a utilização de algum sistema de telecomunicações. Um dos desafios tecnológicos é o desenvolvimento de sensores que possam ser integrados aos sistemas de telecomunicações. Neste contexto, na presente pesquisa é investigado o desenvolvimento de sensores baseados na tecnologia DGS (*Defected Ground Structures*), utilizando a geometria matrioska, associando as características de miniaturização e a facilidade de integração com outras partes dos sistemas.

Uma estrutura DGS é formada modificando o plano terra por meio da remoção de uma certa geometria de sua camada de metalização [6]. Na Figura 2 é mostrada uma estrutura DGS com geometria de haltere removida da camada de metalização do plano terra. A geometria a ser removida é um dos parâmetros mais flexíveis no projeto desse tipo de estrutura, através da qual sua resposta em frequência pode ser ajustada.

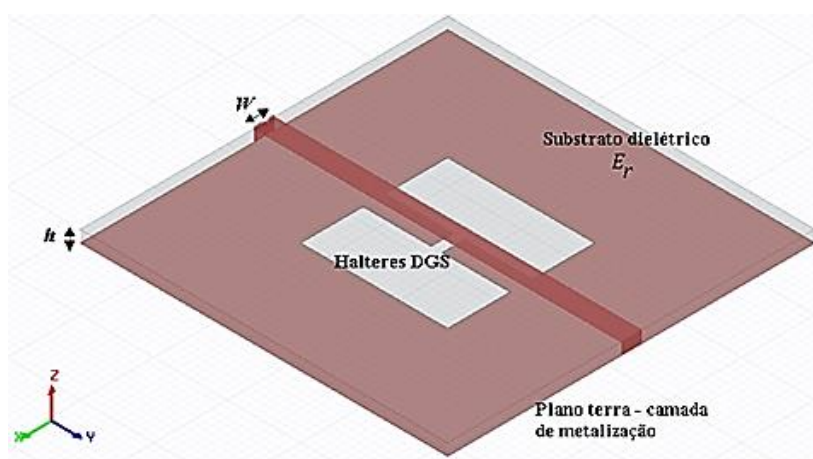
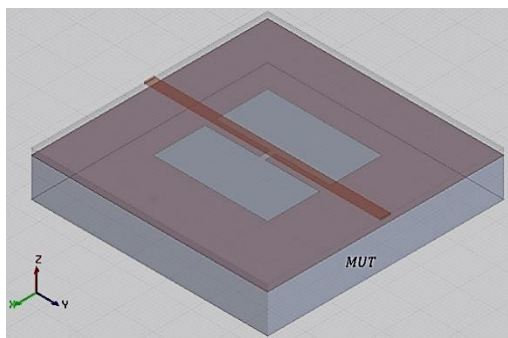
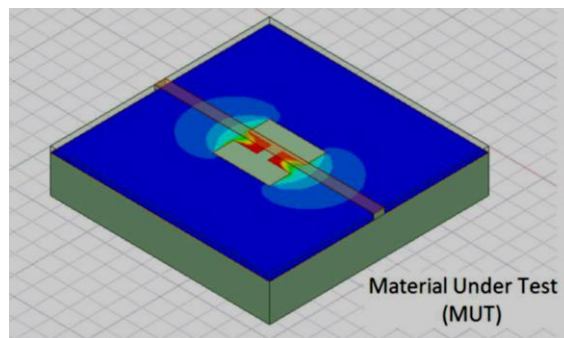


Fig. 2 – Estrutura DGS – Geometria de haltere.

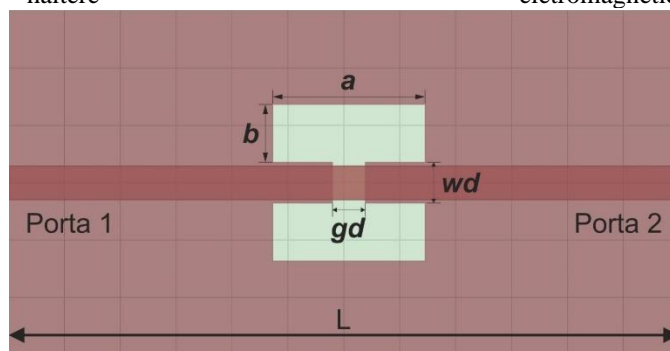
Ao colocar o MUT na região da estrutura DGS, como ilustrado na Figura 3, há uma interação entre os campos eletromagnéticos e o material, alterando assim a sua resposta em frequência, podendo essa alteração ser usada como um sensor.



a) Vista isométrica do sensor DGS com geometria haltere



b) Ilustração da interação dos campos eletromagnéticos com o MUT



c) Dimensões consideradas da geometria haltere

Fig. 3 – Sensor DGS – Geometria de haltere.

Embora exista uma grande flexibilidade quanto as geometrias que podem ser usadas nas estruturas DGSs (Ex: interdigital, haltere de espira aberta, espira quadrada aberta com fenda intermediária, haltere de forma aberta, ponta de seta, cabeça em espiral etc.), como ilustrado na Figura 4, a evolução contínua da indústria de sensores, com um número grande de sensores sendo incorporado em dispositivos sem fio e a convergência digital, requerem que novas geometrias sejam desenvolvidas. Neste contexto, um sensor DGS baseado na geometria matrioska é investigado nesta dissertação. A ideia é aproveitar as características de miniaturização e a seletividade da geometria matrioska, que inicialmente teve sua aplicação em superfícies seletivas em frequência, FSS, [7], [8], apresentando redução na frequência de ressonância, para obter um sensor DGS com dimensões menores e maior seletividade, quando comparado com outras geometrias, como, por exemplo, o haltere [6], [9].

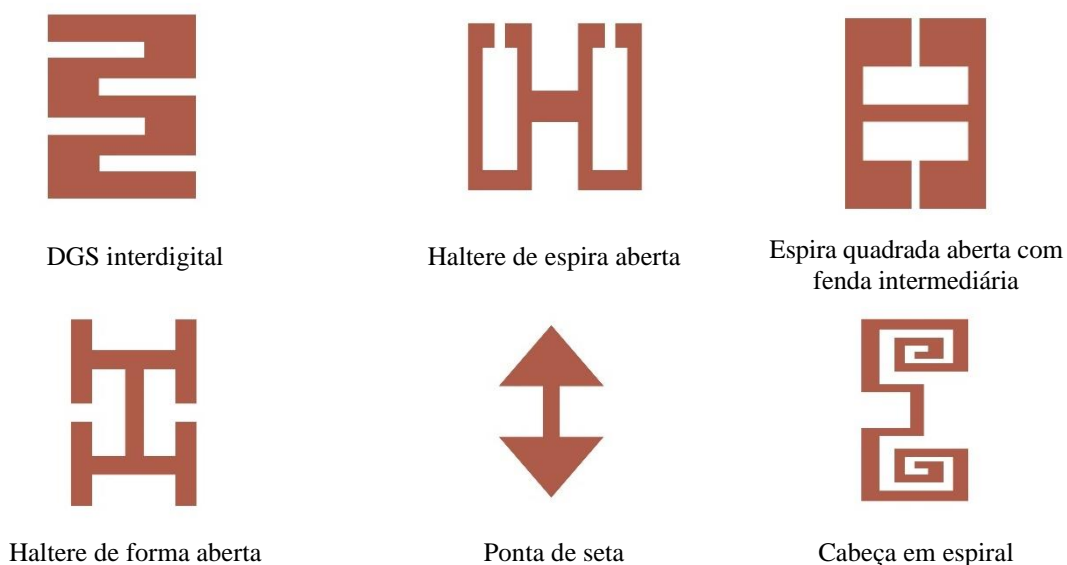


Fig. 4. Exemplos de geometrias DGSs.

Dessa forma, foram investigados os procedimentos de projeto, incluindo as equações iniciais de projeto, as caracterizações numérica e experimental do sensor proposto e a sua aplicabilidade, comparando-o com sensores DGSs baseados em outras geometrias. Para validar os sensores propostos, esses foram aplicados na determinação do teor de álcool isopropílico em uma solução aquosa, tendo sido possível identificar, entre as configurações estudadas, as que apresentaram os melhores resultados.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver sensores DGSs utilizando a geometria matrioska.

1.1.2. Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Revisar a bibliografia relativa ao projeto, abrangendo, principalmente, os conceitos básicos da geometria matrioska, e dos sensores DGSs;
- ✓ Projetar e caracterizar numericamente sensores DGSs usando a geometria matrioska;
- ✓ Fabricar e caracterizar experimentalmente os sensores projetados e comparar os resultados obtidos com os resultados numéricos;
- ✓ Avaliar a adequação das equações iniciais de projeto e sua aplicabilidade;
- ✓ Analisar o desempenho dos sensores propostos e realizar a comparação com sensores DGSs de outras geometrias.
- ✓ Divulgar os resultados obtidos por meio da publicação de artigos em congressos e periódicos específicos da área; e
- ✓ Elaborar e defender a dissertação do mestrado.

No próximo Capítulo são apresentados os conceitos básicos da geometria matrioska, como essa é obtida, assim como as equações básicas de projeto. Além disso, serão apresentados os critérios pelos quais os sensores serão avaliados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Geometria matrioska

Diversas pesquisas têm sido feitas pelo Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA), do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), utilizando da geometria matrioska para diferentes aplicações, destacando-se as superfícies seletivas em frequência [7], [8], e os filtros [10], [11], observando-se características como miniaturização e seletividade. Essas características tornam a geometria matrioska bastante atrativa para aplicações nos sensores, em especial para sensores que atuem incorporados aos sistemas de comunicação sem fio.

A geometria matrioska foi introduzida em [7], [8], sendo flexível a quantidade de anéis que pode ser considerada, dependendo das dimensões e das técnicas de fabricação utilizadas. Porém, inicialmente, para o entendimento de como a geometria matrioska é obtida, apenas um anel matrioska, composto por dois anéis concêntricos interligados, foi considerado nesta dissertação.

Para se obter a geometria matrioska, inicialmente são projetados dois anéis concêntricos, Figura 5(a). Em seguida, as fendas são inseridas nos anéis, na mesma posição, Figura 5(b). Finalmente, os anéis são interconectados e o anel matrioska é obtido, Figura 5(c).

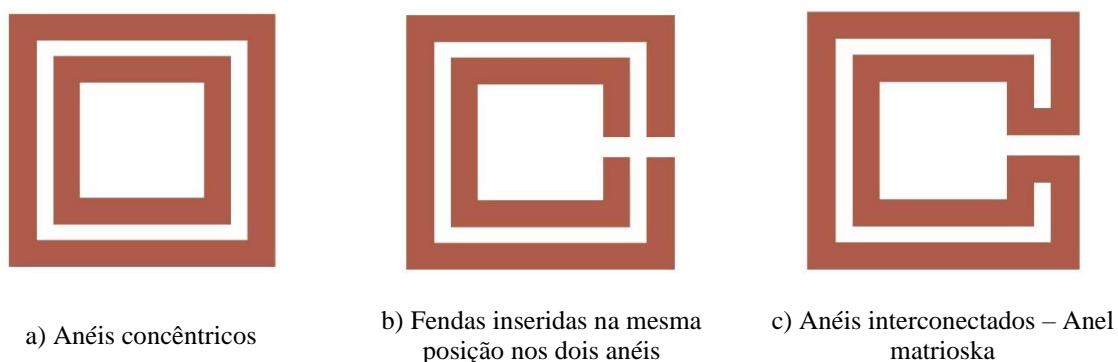


Fig. 5 – Geometria matrioska passo a passo.

A geometria matrioska é caracterizada pela interligação de seus anéis concêntricos, aumentando o comprimento efetivo, sem ocupar uma área maior, limitando-se ao tamanho da área do anel mais externo, Figura 6. Superfícies seletivas em frequência, FSS [7], [8], filtros [11] e sensores [12] são exemplos de aplicações da geometria matrioska e suas variações.

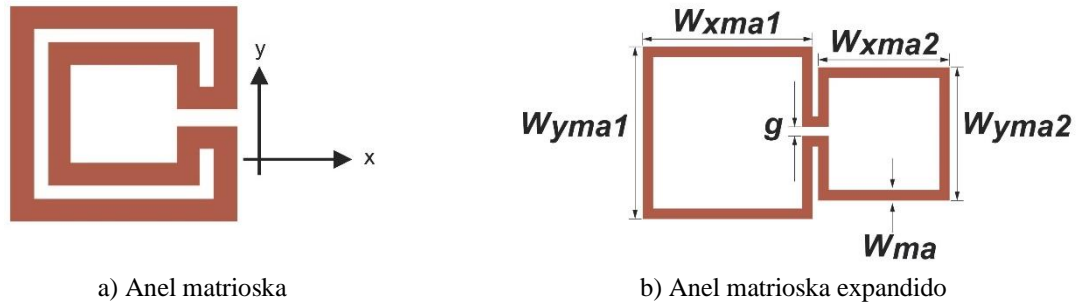


Fig. 6 – Geometria matrioska – dimensões.

Algumas equações iniciais de projeto foram obtidas a partir das dimensões da estrutura, Figura 6. Normalmente, $w_{xma1} = w_{yma1} = w_{ma1}$ e $w_{xma2} = w_{yma2} = w_{ma2}$. Com base em trabalhos anteriores [7], [12], como uma primeira abordagem, considerando o sensor vazio, ou seja, o MUT é o ar, a frequência de ressonância pode ser estimada por:

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

sendo,

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

e,

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

ϵ_{refe} é a permissividade elétrica relativa para a linha de microfita de largura w , considerando um substrato de espessura h e permissividade elétrica relativa ϵ_r , podendo ser facilmente calculada utilizando programas computacionais, como por exemplo, o disponível em [12].

Para a matrioska com três anéis concêntricos a equação (1) continua válida, porém o comprimento efetivo (L_{eff}) é dado por:

$$L_{eff} = 3 \times (w_{ma1-avg} + w_{ma3-avg}) + 2 \times w_{ma2-avg} \quad (4)$$

e,

$$w_{mai-avg} = w_{mai} - w_{ma}, \quad i = 1,2 \text{ e } 3 \quad (5)$$

Deve-se destacar que (1) – (5) são equações iniciais de projetos consistindo em um primeiro passo para uma otimização numérica.

No sensor DGS proposto, o anel matrioska é centrado sob a linha de microfita conforme ilustrado na Figura 7. A largura da microfita é w , a espessura do substrato h , e sua constante dielétrica ϵ_r . A espessura do MUT é h_t . Vale a pena mencionar que no sensor DGS proposto, à semelhança de uma FSS passa faixa [13], a geometria matrioska é retirada da camada de metalização do plano terra.

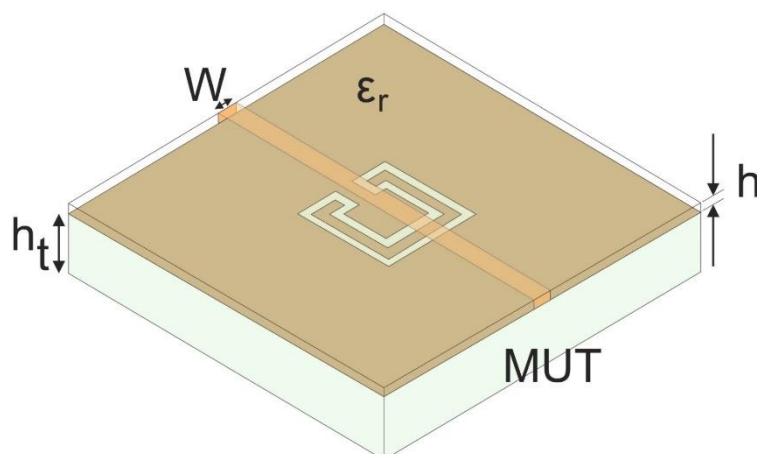


Fig. 7 – Sensor DGS – Geometria matrioska.

Outra configuração considerada, foi a utilização do anel matrioska em aberto, conforme ilustrado na Figura 8. Uma das vantagens dessa configuração é que a frequência de ressonância é aproximadamente a metade da obtida sem a presença da fenda.

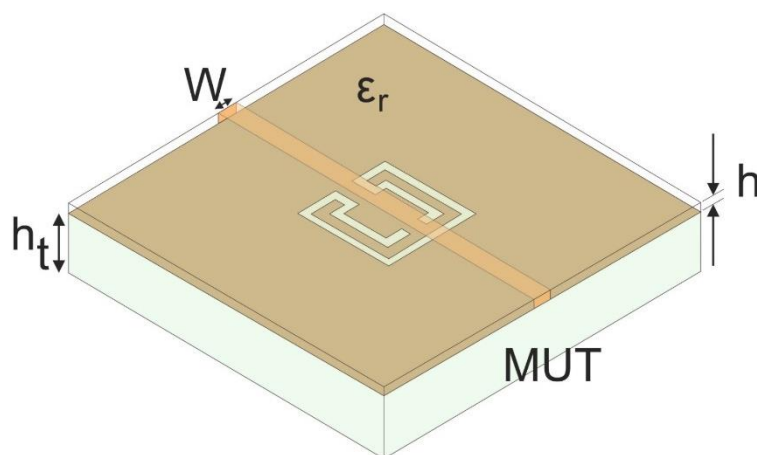


Fig. 8 – Sensor DGS – Geometria matrioska – anel aberto.

2.2. Parâmetros de avaliação dos sensores

Nesta dissertação, os sensores são avaliados dentro de uma faixa de frequência de interesse. Os principais critérios utilizados nessa avaliação são ilustrados na Figura 9, definidos conforme apresentado a seguir.

- ✓ Frequência de ressonância (f_{res}): é a frequência para qual o sinal de saída apresenta uma máxima atenuação;
- ✓ Frequência de corte 1 (f_{c1}): é a frequência, inferior à frequência de ressonância, para qual o sinal de saída apresenta uma queda de 3 dB em relação ao máximo sinal de saída;
- ✓ Frequência de corte 2 (f_{c2}): é a frequência, posterior, à frequência de ressonância, para qual o sinal de saída apresenta uma queda de 3 dB, em relação ao máximo sinal de saída;
- ✓ Largura de Banda (BW): indica a faixa de frequência para a qual o sinal de saída está abaixo de 3 dB, sendo determinado por $BW = (f_{c2} - f_{c1})$;
- ✓ Fator de qualidade (Q): indica a seletividade do sensor, sendo determinado por $Q = \frac{BW}{f_{res}}$. Quanto maior o seu valor, mais seletivo é o sensor;
- ✓ Fator de atenuação (Q_A): indica a sensibilidade do sensor, sendo determinado por $Q_A = \frac{A_{f_{res}}}{BW}$, onde $A_{f_{res}}$ é a atenuação na frequência de ressonância. Quanto maior o seu valor, mais o filtro é sensível, ou seja, mais facilmente é possível determinar a frequência de ressonância;

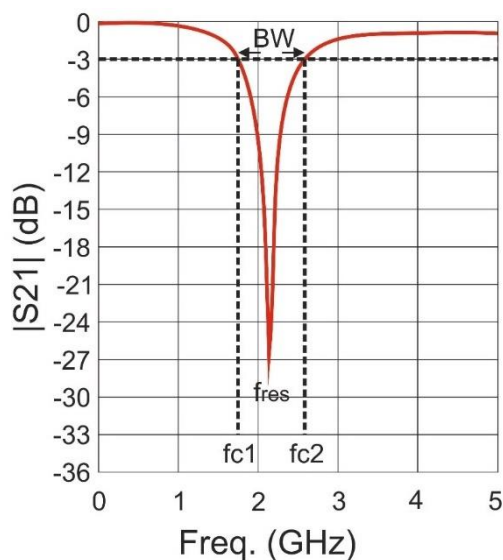


Fig. 9 – Parâmetros utilizados na avaliação do sensor.

No Capítulo a seguir serão apresentados as configurações propostas e os resultados obtidos.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

A validação dos procedimentos de projeto, incluindo a aplicabilidade das equações iniciais de projeto, foi realizada por meio de simulações computacionais, o que torna possível avaliar o funcionamento do sensor projetado, facilitando as análises dos resultados, assim como a implementação de possíveis modificações. Os resultados numéricos das simulações foram obtidos usando o software Ansys Eletromagnetics Suite 19.1 [14]. Além das simulações, foram realizadas caracterizações experimentais, o que será detalhado mais adiante neste Capítulo.

Nas simulações dos sensores DGS-matrioska projetados foram adotadas as seguintes especificações:

- ✓ Substrato FR-4 de baixo custo, de espessura $h = 1,6 \text{ mm}$, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $0,02$;
- ✓ O MUT sobre os sensores DGS tem dimensões ($62 \text{ mm} \times 62 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$);
- ✓ Largura da linha de microfita $w = 2,8 \text{ mm}$;
- ✓ Distância entre as portas 1 e 2, $L = 62 \text{ mm}$.

As simulações numéricas e caracterizações experimentais foram realizadas em duas etapas. Na primeira é considerada apenas uma geometria de sensor DGS-matrioska, sendo esse comparado com sensores na geometria haltere. Na segunda parte são consideradas diferentes configurações de sensores DGS-matrioska, levando-se em conta resultados numéricos e experimentais.

3.1 Comparação do sensor DGS-matrioska com a geometria haltere

Nesta etapa são consideradas as seguintes especificações:

- ✓ As dimensões da geometria matrioska usadas no sensor foram $w_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 9,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$ e $g = 1 \text{ mm}$, DGSM;
- ✓ As dimensões da geometria halteres usados no sensor ocupando a mesma área do matrioska foram $a = 15,5 \text{ mm}$, $b = 6,25 \text{ mm}$, $w_d = 3 \text{ mm}$ e $g_d = 1,5 \text{ mm}$, DGSH1;

- ✓ As dimensões da geometria halteres usados no sensor projetado para mesma frequência do matrioska foram $a = 30 \text{ mm}$, $b = 13,6 \text{ mm}$, $w_d = 3 \text{ mm}$ e $g_d = 1,5 \text{ mm}$, DGS2;

Os protótipos digitais de sensores foram projetados com as seguintes características:

- 1) Um sensor com um anel matrioska, composto por dois anéis concêntricos;
- 2) Um sensor com geometria haltere, cuja dimensão ocupa praticamente a mesma área do sensor matrioska.
- 3) Um sensor com geometria haltere, cujas dimensões foram projetadas para se obter a mesma frequência do sensor matrioska.

Usando o módulo Designer nas simulações, inicialmente fez-se a caracterização dos sensores em vazio e os resultados iniciais são apresentados nas Figuras 10, 11 e 12.

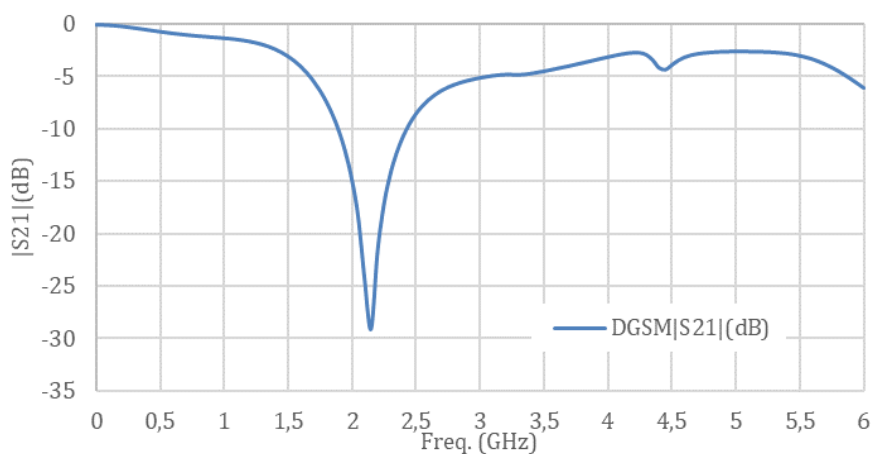


Fig. 10 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska vazio, $w_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 9,5 \text{ mm}$.

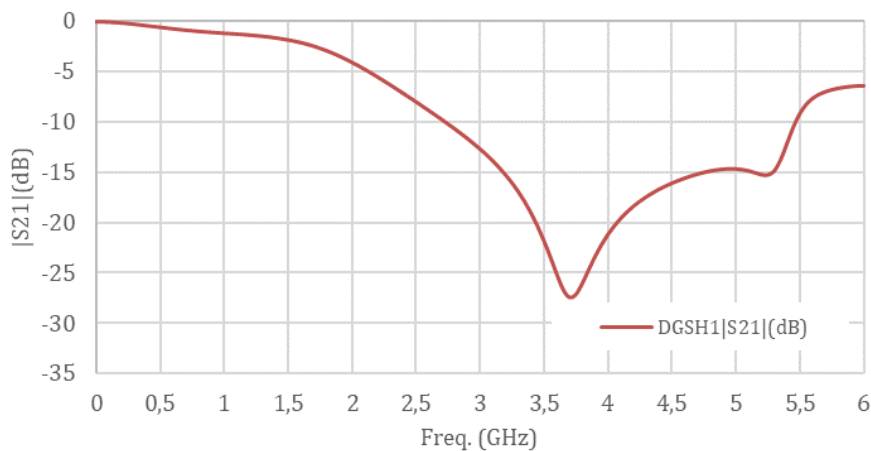


Fig. 11 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS haltere vazio, $a = 15,5 \text{ mm}$, $b = 6,25 \text{ mm}$, $w_d = 3 \text{ mm}$ e $g_d = 1,5 \text{ mm}$.

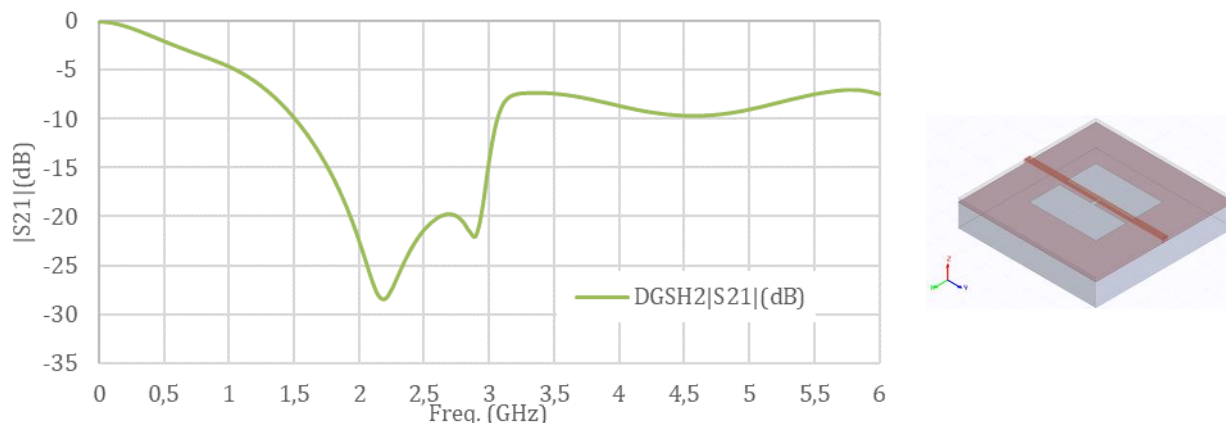


Fig. 12 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS haltere vazio, $a = 30,0 \text{ mm}$, $b = 13,6 \text{ mm}$, $w_d = 3 \text{ mm}$ e $g_d = 1,5 \text{ mm}$.

Para uma melhor visualização dos resultados numéricos dos sensores caracterizados como vazio, observe-se a Figura 13.

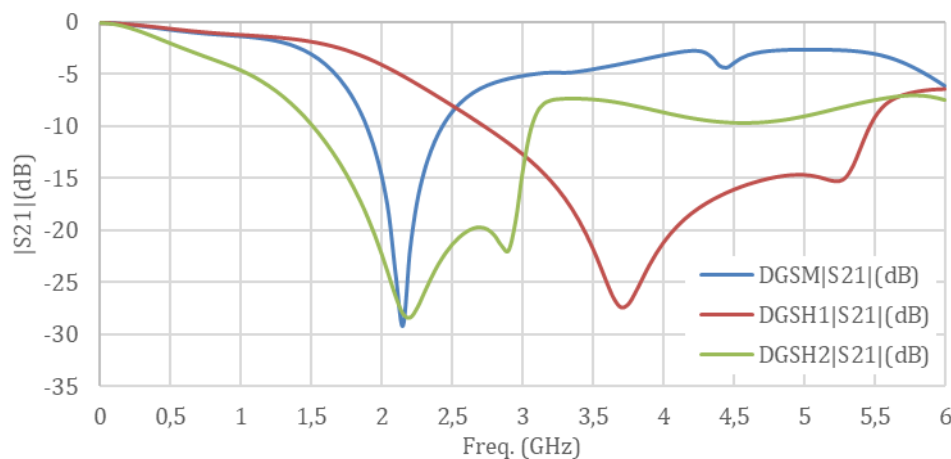


Fig. 13 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensores vazios.

A frequência de ressonância numérica do sensor matrioska foi de 2,15 GHz, resultado muito bom em comparação ao esperado pelas equações iniciais do projeto que é de 2,16 GHz, com diferença de 0,4%, indicando a aplicabilidade dessas equações.

Tomando como referência o limiar de -10 dB para o coeficiente de transmissão, observa-se que o sensor DGS matrioska (DGSM) apresenta uma largura de banda de 0,5 GHz. Considerando o sensor DGS haltere de mesma frequência de ressonância, DGSH2, a sua largura de banda é 1,55 GHz, portanto o sensor DGS-haltere é 3,1 vezes maior que o sensor DGS-matrioska. Por outro lado, ainda comparando com o DGSH2, observa-se que a área ocupada pelo mesmo é 861 mm^2 , 3,58 vezes a área ocupada pelo DGSM, que é $240,25 \text{ mm}^2$. O DGSH1, que ocupa praticamente a mesma área do DGSM, apresenta uma frequência de ressonância de 3,7 GHz, 48% a mais, quando comparado com a frequência de

ressonância do DGSM. Confirma-se assim as características de seletividade e miniaturização do sensor matrioska.

Para verificar a sensibilidade do sensor matrioska, a água destilada ($\epsilon_r = 80,1[15]$) foi utilizada como o MUT nos três sensores. As respostas em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times frequência (GHz) obtidas são apresentadas nas Figuras 14, 15 e 16.

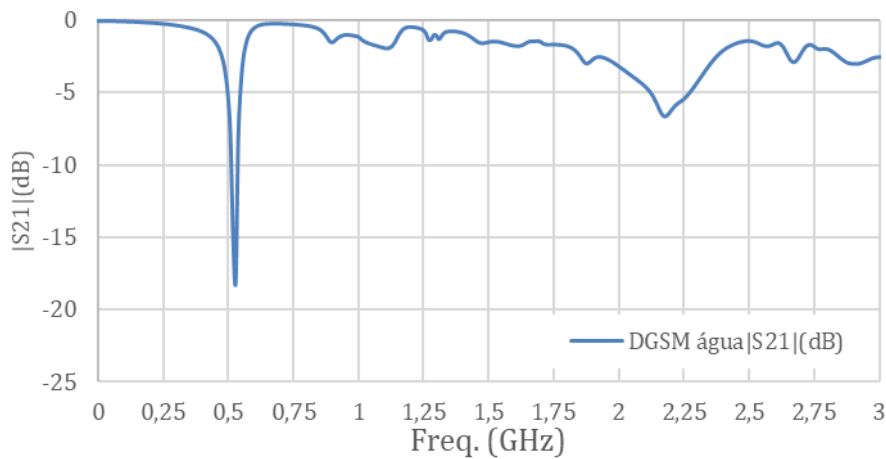


Fig. 14 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska com água destilada, $w_{\text{ma1}} = 15,5$ mm, $w_{\text{ma2}} = 9,5$ mm.

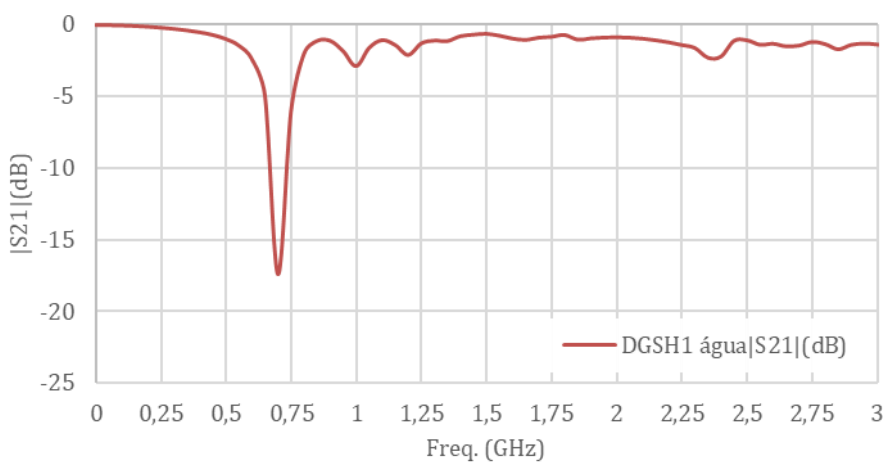


Fig. 15 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS haltere com água destilada, $a = 15,5$ mm, $b = 6,25$ mm, $w_d = 3$ mm e $g_d = 1,5$ mm.

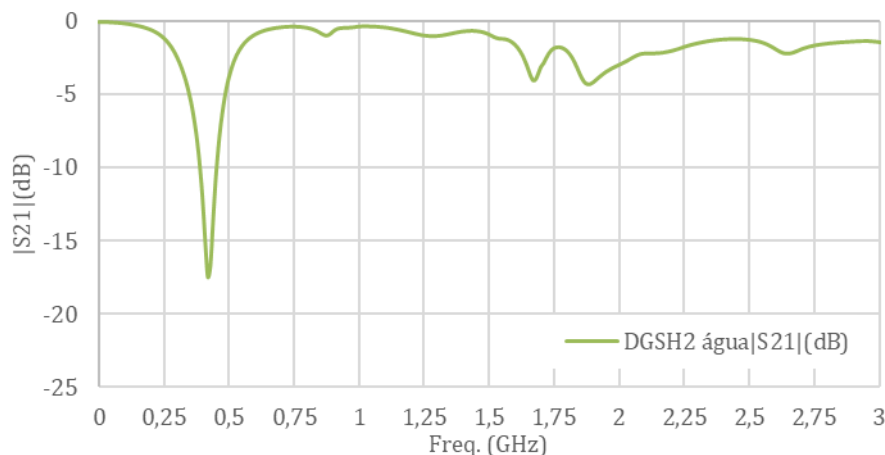


Fig. 16 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS haltere com água destilada, $a = 30,0 \text{ mm}$, $b = 13,6 \text{ mm}$, $w_d = 3 \text{ mm}$ e $g_d = 1,5 \text{ mm}$

Na Figura 17 há uma comparação dos resultados numéricos obtidos.

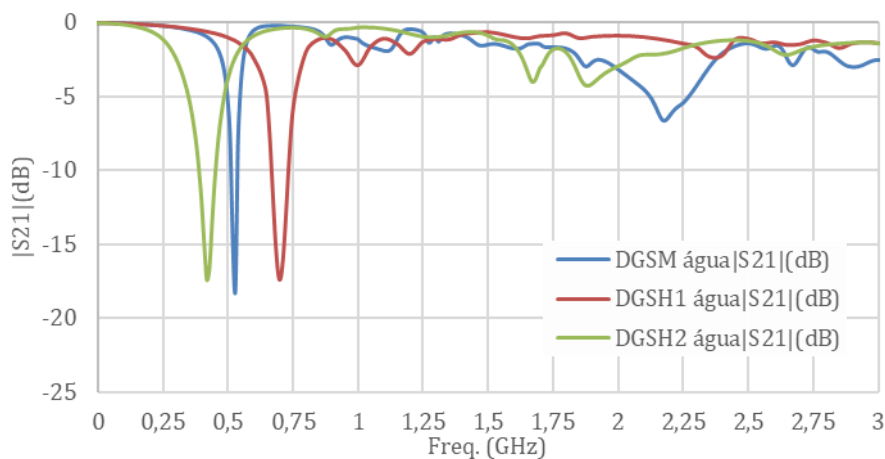


Fig. 17 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensores com água destilada.

Da análise da Figura 17, verifica-se que o sensor DGS2 apresentou uma menor frequência de ressonância. Isso se deve a maior área de interação entre o sensor e o MUT, porém o sensor DGSM apresenta uma boa variação da frequência de ressonância em vazio e com a água destilada, além de uma maior seletividade.

Em seguida, o álcool isopropílico ($\epsilon_r = 19,9$ [15]) foi considerado como MUT e o funcionamento do sensor DGS-matrioska foi verificado novamente em comparação aos sensores halteres. As respostas em frequência obtida, $|S_{21}|$ (dB) \times frequência (GHz), são apresentadas nas Figuras 18, 19 e 20.

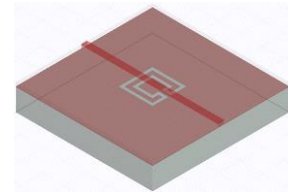
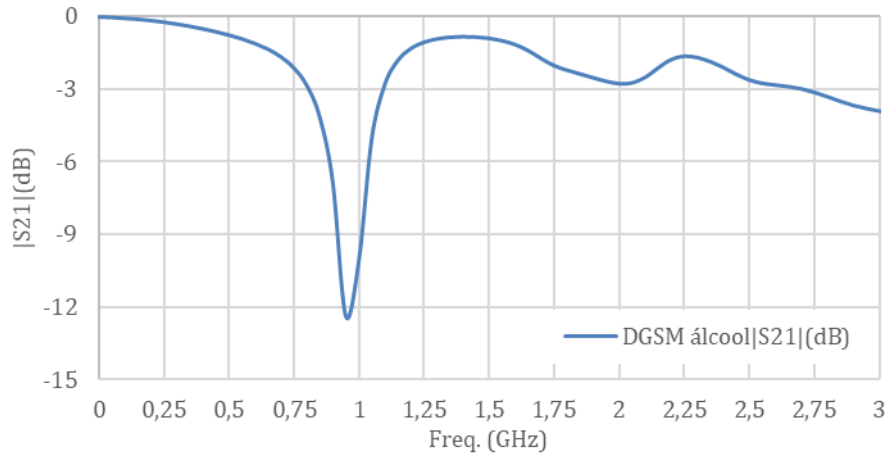


Fig. 18 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska com álcool isopropílico, $w_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 9,5 \text{ mm}$.

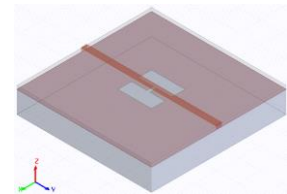
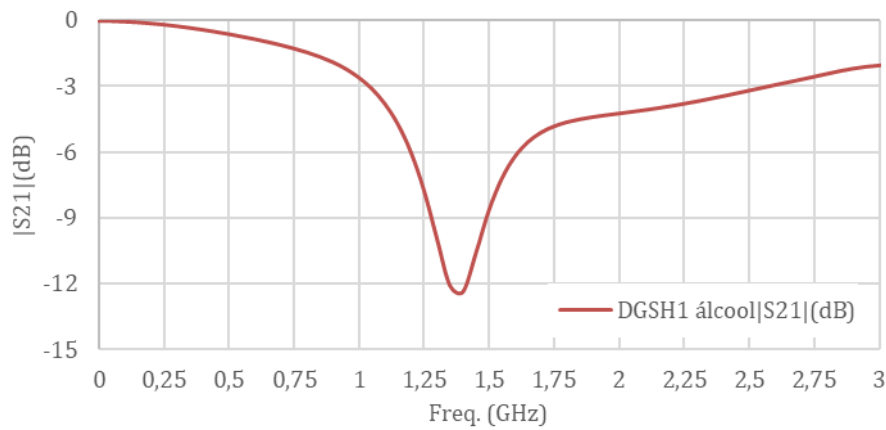


Fig. 19 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS halteres com álcool isopropílico, $a = 15,5 \text{ mm}$, $b = 6,25 \text{ mm}$, $w_d = 3 \text{ mm}$ e $g_d = 1,5 \text{ mm}$.

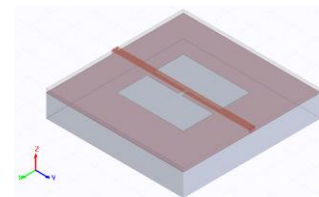
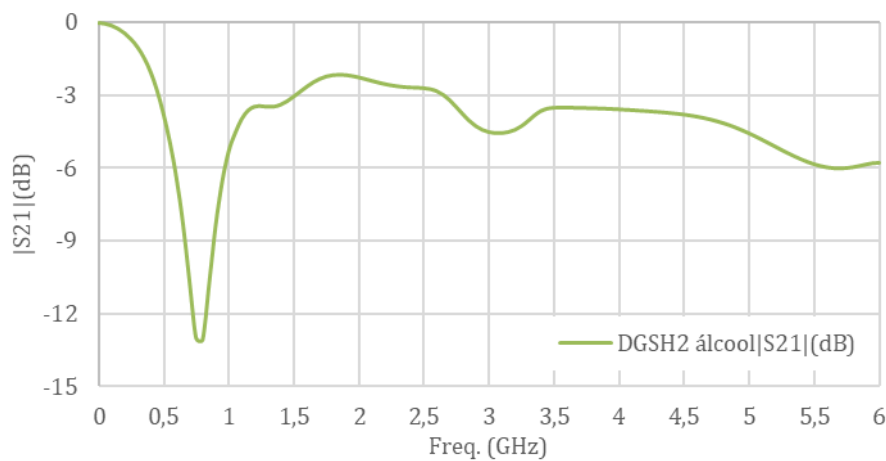


Fig. 20 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS halteres com álcool isopropílico, $a = 30,0 \text{ mm}$, $b = 13,6 \text{ mm}$, $w_d = 3 \text{ mm}$ e $g_d = 1,5 \text{ mm}$

Para uma melhor observação do comportamento dos sensores caracterizados com álcool isopropílico, na Figura 21 são apresentadas as três respostas em frequência. Analogamente ao observado com a água destilada, verifica-se que o sensor DGSH2 apresentou uma menor frequência de ressonância, porém o sensor DGSM é mais seletivo e apresentou uma considerável redução na frequência de ressonância.

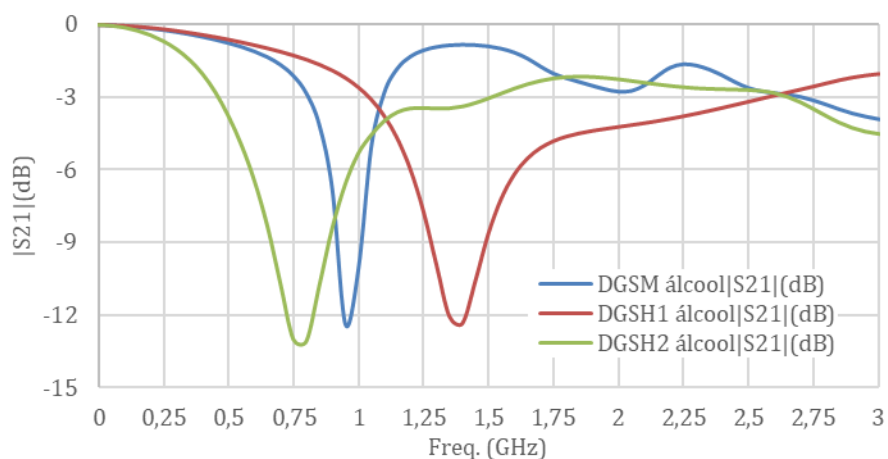


Fig. 21 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensores com álcool isopropílico.

As dimensões e as frequências de ressonância dos sensores caracterizados numericamente estão resumidas na Tabela I e na Tabela II, respectivamente.

Tabela I – Dimensões DGSM (DGS matrioska) e DGSH (haltere)

	w_{ma1}	w_{ma2}	w_{ma}	g
DGSM	15,5 mm	9,5 mm	1,5 mm	1,0 mm
	a	b	w_d	g_d
DGSH1	15,5 mm	6,25 mm	3,0 mm	1,5 mm
DGSH2	30,0 mm	13,5 mm	3,0 mm	1,5 mm

Tabela II – Frequências Ressonantes dos Sensores DGSs

$f_{res_sesor\ M}$	$f_{res_sesor\ H1}$	$f_{res_sesor\ H2}$	$\left(\frac{f_{res_sensor\ M}}{f_{res_sensor\ H1}}\right)\%$			
DGSM_{vazio}	2,15 GHz	DGSH1_{vazio}	3,7 GHz	DGSH2_{vazio}	2,2 GHz	58,1%
DGSM_{H2O}	0,53 GHz	DGSH1_{H2O}	0,97 GHz	DGSH2_{H2O}	0,42 GHz	75,71%
DGSM_{alcool}	0,95 GHz	DGSH1_{alcool}	1,4 GHz	DGSH2_{alcool}	0,8 GHz	67,85%

Os resultados para largura de banda podem ser observados na Tabela III.

Tabela III – Largura de banda (BW) – Matrioska e haltere

	BW		BW		BW
$DGSM_{vazio}$	0,55 GHz	$DGSH1_{vazio}$	2,71 GHz	$DGSH2_{vazio}$	1,55 GHz
$DGSM_{H2O}$	0,03 GHz	$DGSH1_{H2O}$	0,05 GHz	$DGSH2_{H2O}$	0,07 GHz
$DGSM_{alcohol}$	0,07 GHz	$DGSH1_{alcohol}$	0,18 GHz	$DGSH2_{alcohol}$	0,15 GHz

Portanto, numericamente fica confirmada as características de miniaturização e seletividade do sensor DGS-matrioska.

3.2 Resultados experimentais para diferentes configurações do sensor DGS-matrioska

Os resultados experimentais foram obtidos com o objetivo de avaliar as características do sensor DGS-matrioska para diferentes configurações. As medições foram realizadas no laboratório de Medidas em Telecomunicações, do GTEMA-IFPB, utilizando um analisador de redes (Agilent E5071C) de duas portas. Na Figura 22 é apresentada a configuração de medição. Observe que o MUT foi colocado sobre a área do DGS e consequentemente a microfita está no lado inferior.

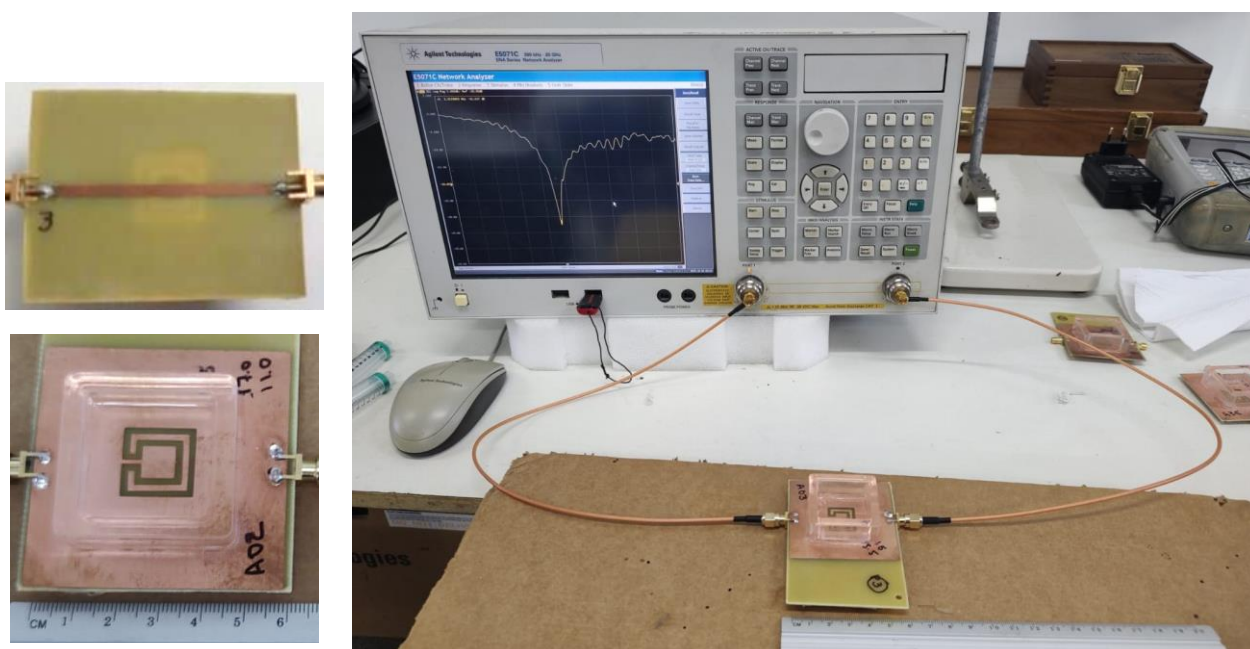


Fig. 22 – Configuração utilizada para realização das medições.

Foram fabricados nove sensores DGS-matrioska, com as especificações apresentadas a seguir e as dimensões resumidas na Tabela IV.

- ✓ Substrato FR-4 de baixo custo, de espessura $h = 1,6 \text{ mm}$, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $0,02$;
- ✓ Impedância característica da linha de transmissão 50Ω
- ✓ A caixa feita de material acrílico sobre o DGS, que é preenchido com o MUT, tem dimensões ($30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$);
- ✓ Largura da linha de microfita $w = 2,8 \text{ mm}$;
- ✓ Distância entre as portas 1 e 2, $L = 60 \text{ mm}$.
- ✓ O coeficiente de transmissão (S_{21}) foi medido para as faixas de frequências de 0 a 5 GHz, com 2001 pontos.

Tabela IV – Dimensões dos sensores DGS-matrioska

Sensor	Núm. de Anéis concêntricos	w_{ma1} (mm)	w_{ma2} (mm)	w_{ma3} (mm)	g (mm)	w_{ma} (mm)	
1	2	17	11		1	1,5	
2	2	15,5	9,5		1	1,5	
3	2	15,5	9,5		1	1	
4	2	15,5	9,5		1	2	
5	2	15,5	9,5		1	1,5	Aberto
6	2	15,5	9,5		1	1	Aberto
7	2	15,5	9,5		1	2	Aberto
8	3	15,5	11,5	7,5	1	1	
9	3	15,5	11,5	7,5	1	1	Aberto

Obs: O número de anéis matrioska é igual ao número de anéis concêntricos menos um.

O procedimento experimental foi constituído das seguintes etapas:

- Etapa 1: caracterização em sensor DGS-matrioska em vazio, para avaliar se a resposta em frequência está de acordo com as equações iniciais de projeto;
- Etapa 2: caracterização em sensor DGS-matrioska considerando o MUT como sendo água destilada e depois como sendo álcool isopropílico;
- Etapa 3: caracterização em sensor DGS-matrioska considerando o MUT como sendo uma mistura de água destilada e álcool isopropílico, com diferentes quantidades de água e álcool isopropílico (variou-se a quantidade de álcool isopropílico na mistura de 0% (100% água) até 100% (0% água), de 10% em 10%);

Etapa 4: Avaliação dos resultados obtidos segundo os parâmetros especificados na seção

2.2 Parâmetros de avaliação dos sensores DGS-matrioska.

As medições iniciaram-se com o sensor DGS-matrioska 1, sendo os resultados obtidos apresentados nas Figuras 23 (vazio), 24 e 25 (100% água destilada e 100% álcool isopropílico), 26 e 27 (variação da quantidade de água destilada na mistura). Para que seja possível melhor avaliar a resposta em frequência do sensor, nas Figuras 25 e 27 a faixa de frequência é limitada. Na Figura 28 é apresentada a curva de frequência de ressonância em função da quantidade de água na mistura, sendo essa a curva de calibração do sensor. Essa mesma sequência de resultados será adotada para os demais sensores.

Considerando o sensor DGS-matrioska em vazio, Figura 23, observa-se uma concordância muito boa entre os resultados numéricos e experimentais. O mesmo pode-se dizer para MUT sendo 100% água destilada, para a primeira frequência de ressonância. Já para a simulação do MUT como sendo 100% álcool isopropílico, os resultados numéricos e experimentais não apresentaram uma boa concordância. Isso pode ser decorrente das variações da permissividade elétrica do álcool isopropílico com a frequência [16], [17]. Entretanto, como este trabalho tem como ênfase a variação da frequência de ressonância e não o seu valor, foi possível avaliar o funcionamento dos sensores desenvolvidos.

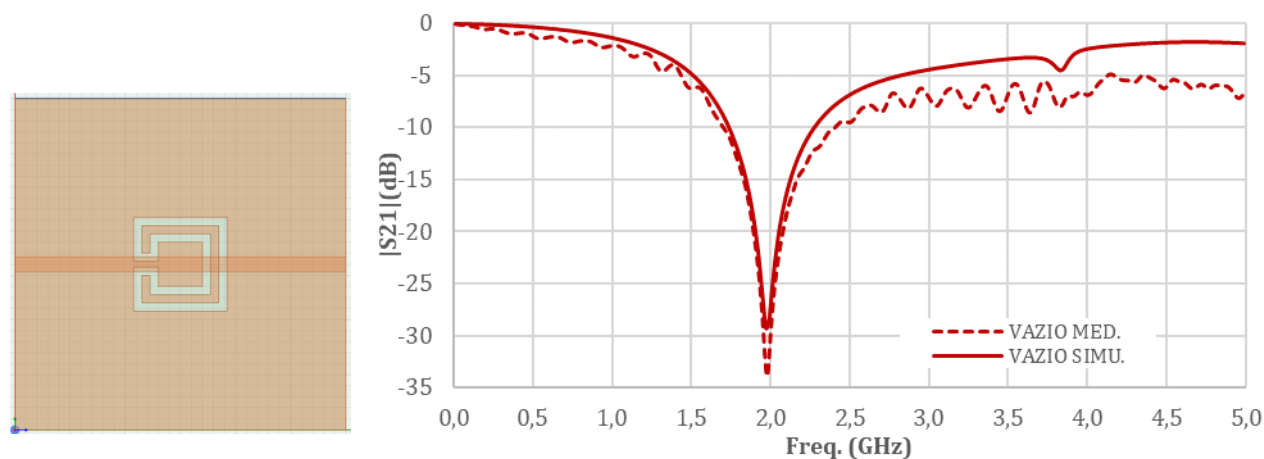


Fig. 23 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 1 vazio, $w_{\text{ma}1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{\text{ma}} = 1,5 \text{ mm}$.

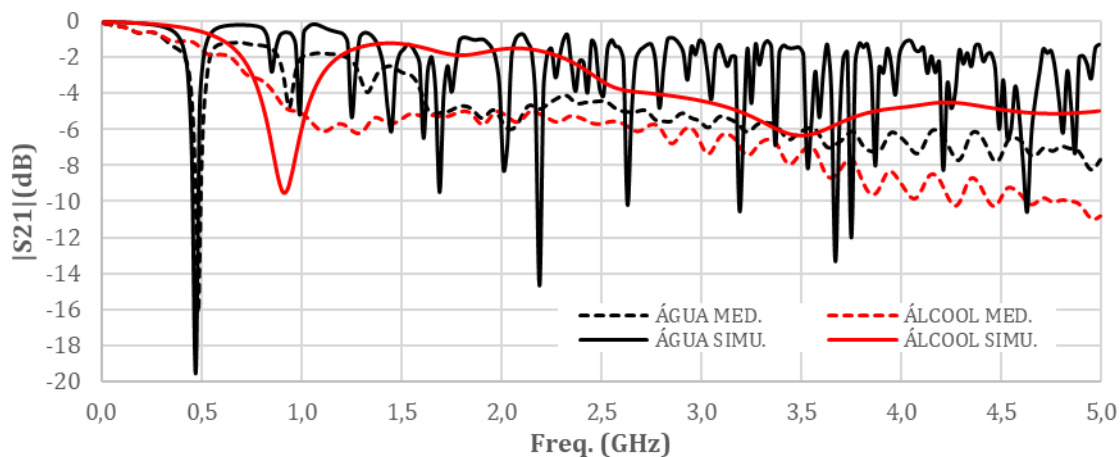


Fig. 24 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 1 com 100% água e 100% álcool.

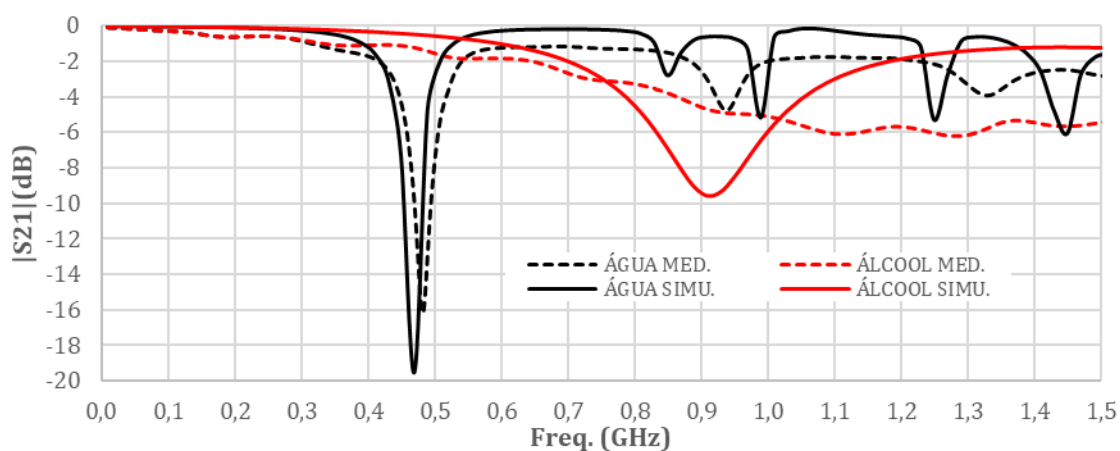
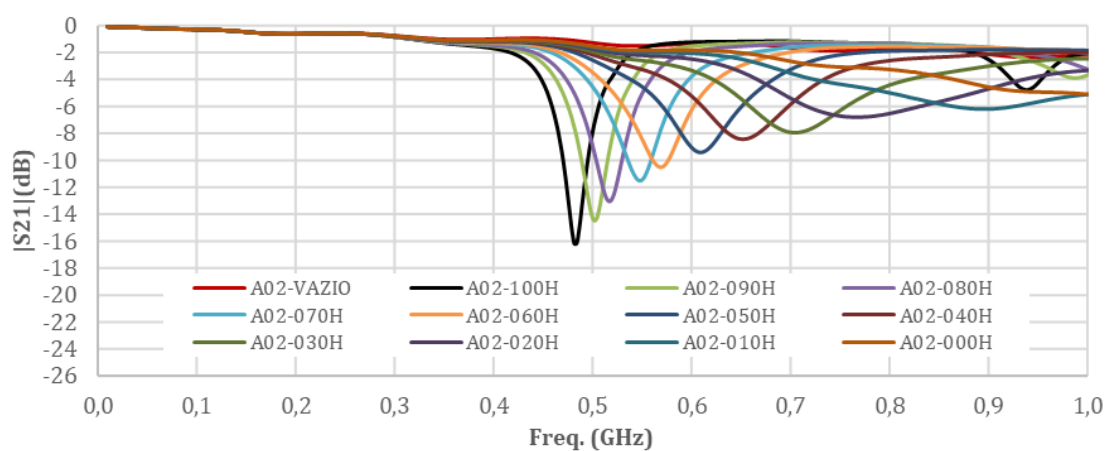
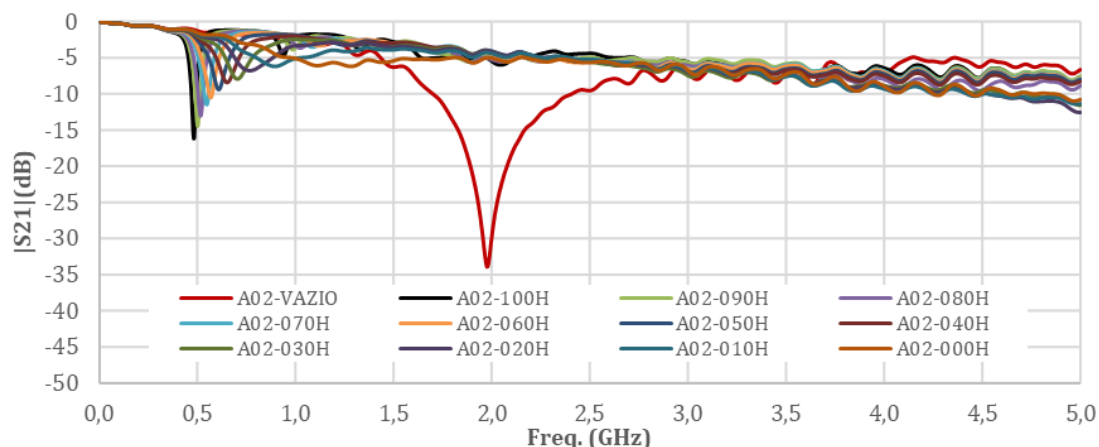


Fig. 25 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 1 com 100% água e 100% álcool.

Na Tabela V é apresentado as frequências ressonantes do sensor DGS-matrioska 1.

Tabela V – Frequências Ressonantes do Sensor 1

	$f_{res_{Med.}}$	$f_{res_{simu.}}$	$f_{res_{calc.}}$	<i>diferença%</i>
vazio	1,98 GHz	1,97 GHz	2,03 GHz	0,5%
água	0,48 GHz	0,47 GHz	–	2,0%
álcool	1,12 GHz	0,91 GHz	–	18,75%



Dos resultados apresentados na Figura 28, verifica-se que a frequência de ressonância pode ser determinada para misturas com 20% a 100% de água destilada. Destaque-se que a curva de calibração informa apenas o valor da frequência de ressonância, não evidenciando se existe uma maior ou menor facilidade para determinar essa ressonância. Essa questão será evidenciada a partir da análise dos parâmetros apresentados na Tabela VI.

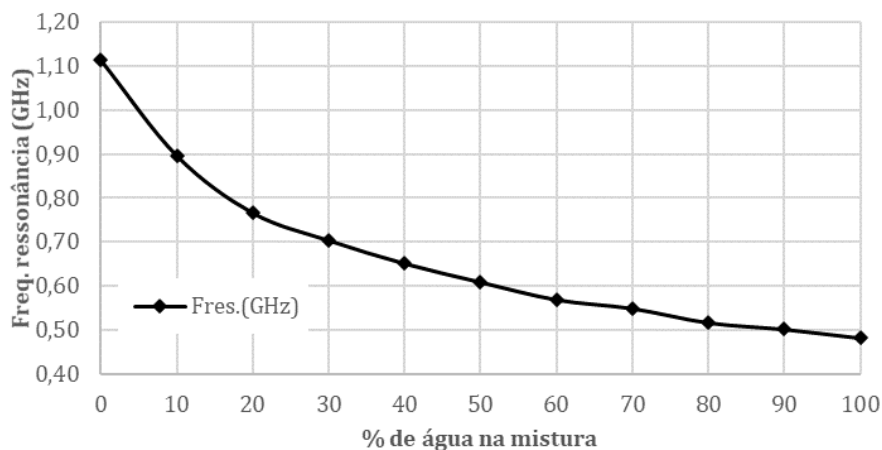
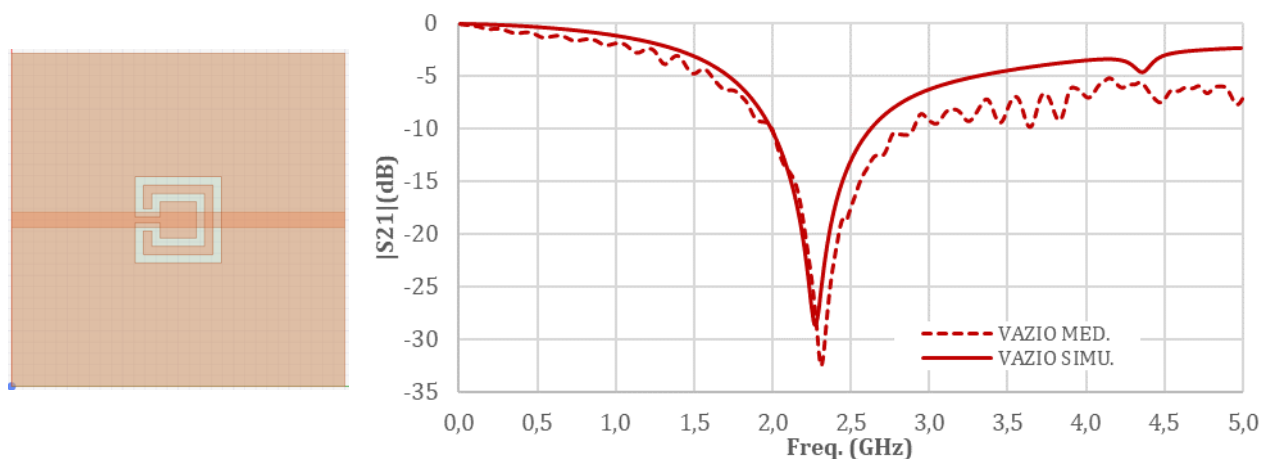


Tabela VI – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 1

% Água	f_r (GHz)	Q (-3 dB)	Q_A (dB/GHz)	BW(GHz)
0	1,1128			
10	0,8957			
20	0,7660	1,54	13,62	0,50
30	0,7036	2,43	27,46	0,29
40	0,6512	2,81	36,34	0,23
50	0,6088	3,13	48,39	0,19
60	0,5689	3,62	66,92	0,16
70	0,5489	4,15	86,97	0,13
80	0,5165	4,70	118,88	0,11
90	0,5015	5,03	145,02	0,10
100	0,4816	5,52	185,22	0,09

O segundo sensor DGS com geometria matrioska de dois anéis concêntricos retangulares, possui a dimensão do anel mais externo, $w_{ma1} = 15,5$ mm, inicialmente foi calibrado e medido como vazio. O resultado das medições é apresentado na Figura 29, observando-se uma boa concordância com os resultados numéricos das simulações. A frequência de ressonância numérica foi 2,27 GHz, enquanto o valor medido marcou 2,31 GHz, uma diferença de 1,7 %. Como esperado, reduzindo-se a dimensão do anel mais externo, aumentou a frequência de ressonância.

Fig. 29 – $|S_{21}|$ (dB)×Freq. (GHz), sensor DGS matrioska 2 vazio, $w_{ma1} = 15,5$ mm, $w_{ma} = 1,5$ mm.

De maneira semelhante ao sensor 1, até a primeira frequência de ressonância, para 100% de água destilada observa-se uma boa concordância entre os resultados simulados e experimentais e resultados não tão bons para 100% de álcool isopropílico, Figuras 30 e 31.

Analogamente, o sensor DGS-matrioska 2 também não conseguiu determinar os percentuais de água destilada menores que 20%, como pode ser visto nas Figuras 32, 33 e 34.

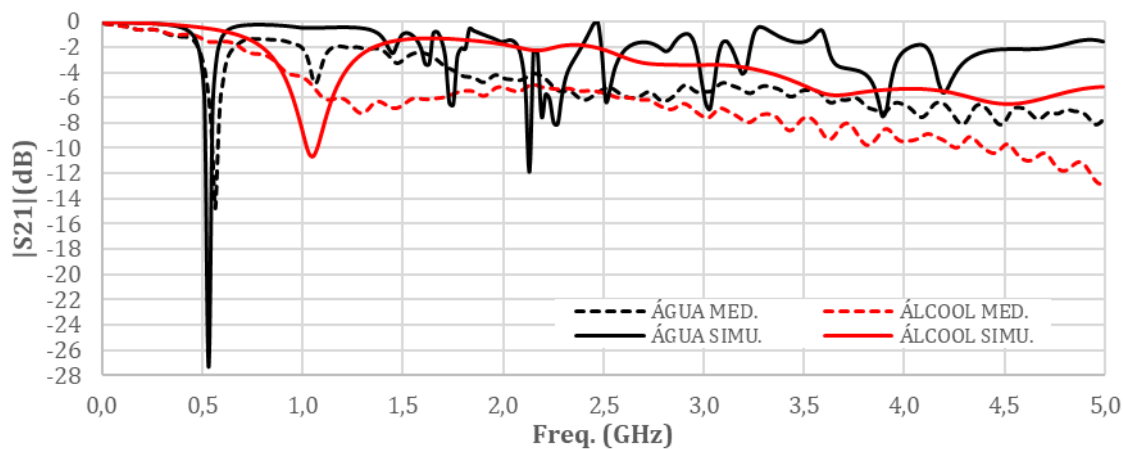


Fig. 30 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 2 com 100% água e 100% álcool.

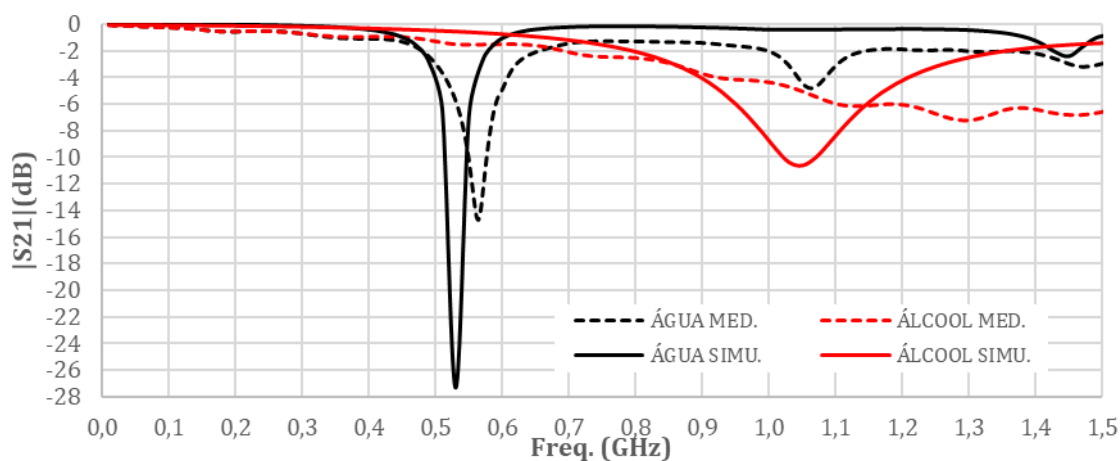


Fig. 31 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 2 com 100% água e 100% álcool.

Na Tabela VII é apresentado um resumo das frequências ressonantes do sensor DGS-matrioska 2.

Tabela VII – Frequências Ressonantes do Sensor DGS-matrioska 2

	$f_{resMed.}$	$f_{resSimu.}$	$f_{resCalc.}$	<i>diferença%</i>
vazio	2,31 GHz	2,27 GHz	2,29 GHz	1,7%
água	0,56 GHz	0,53 GHz	–	5,3%
álcool	1,3 GHz	1,05 GHz	–	19,23%

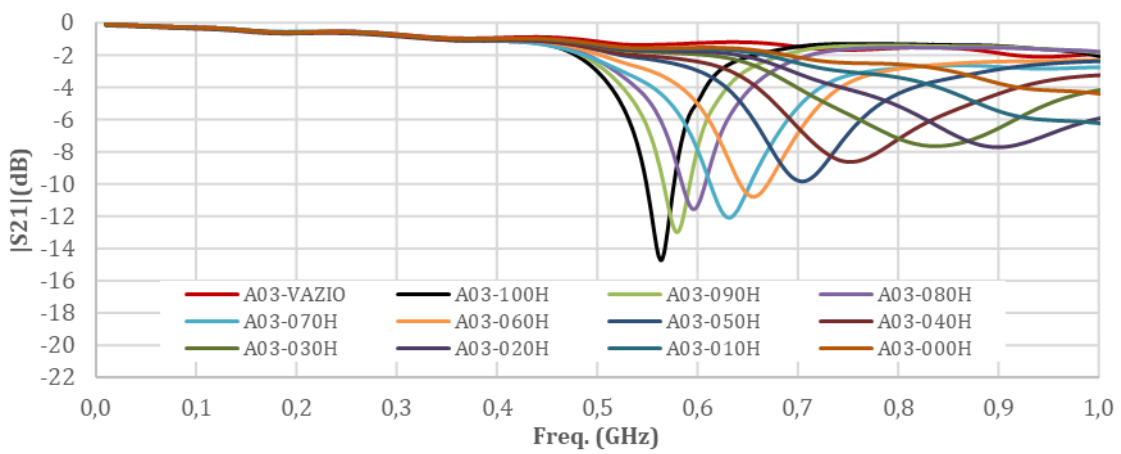
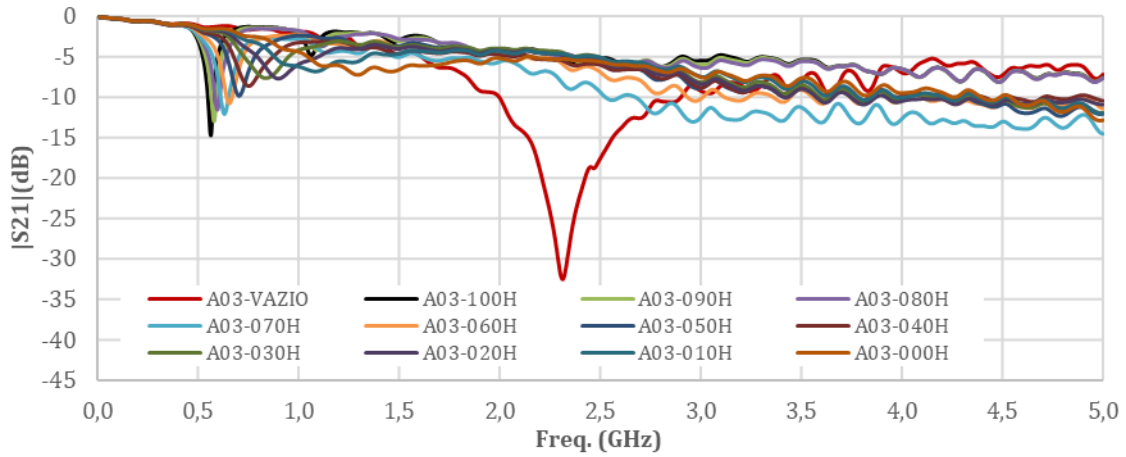


Fig. 33 - $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 2 com mistura líquida.

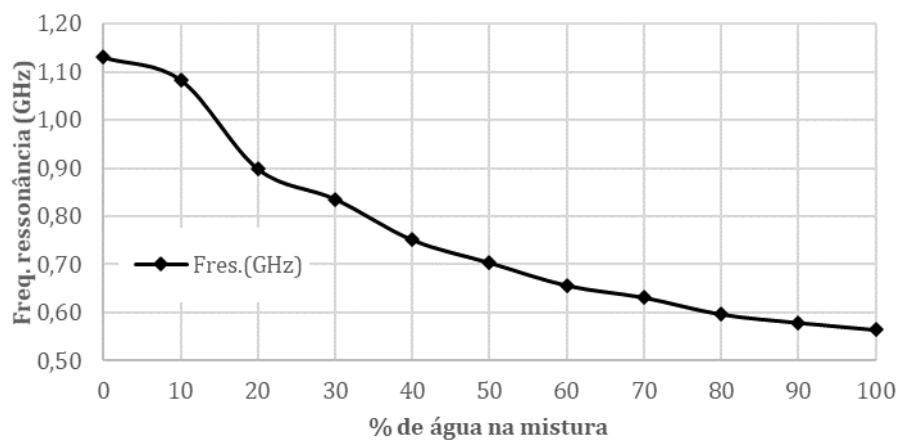


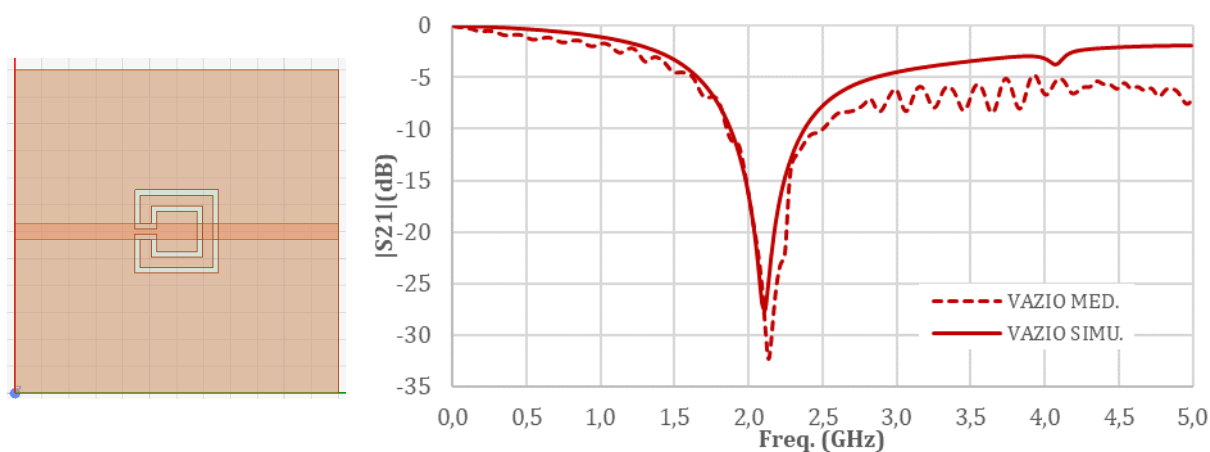
Fig. 34 - Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 2.

Na Tabela VIII são apresentados os parâmetros utilizados para análise do sensor DGS-matrioska 2.

Tabela VIII – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 2

% Água	f_r (GHz)	Q (-3 dB)	Q_A (dB/GHz)	BW(GHz)
0	1,1303			
10	1,0829			
20	0,8982			
30	0,8358	1,58	14,46	0,53
40	0,7510	1,35	15,50	0,56
50	0,7036	2,45	34,27	0,29
60	0,6562	2,83	46,50	0,23
70	0,6313	2,58	49,47	0,24
80	0,5963	3,85	74,73	0,15
90	0,5789	4,22	94,64	0,14
100	0,5639	4,61	120,49	0,12

O terceiro sensor DGS-matrioska caracterizado possui uma única diferença em relação ao sensor 2, a largura das fitas que formam os anéis concêntricos $w_{ma} = 1,0$ mm. Para o sensor em vazio, observou-se uma boa concordância entre as respostas em frequência numéricas e experimentais, Figura 35 e um comportamento semelhante aos dos sensores 1 e 2 para 100% de água destilada e resultados não tão bons para 100% de álcool isopropílico, Figuras 36 e 37. Analogamente, o sensor 3 também não conseguiu determinar os percentuais de água destilada menores que 20%, como pode ser visto nas Figuras 38, 39 e 40.

Fig. 35 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 3 vazio, $w_{ma1} = 15,5$ mm, $w_{ma} = 1,0$ mm.

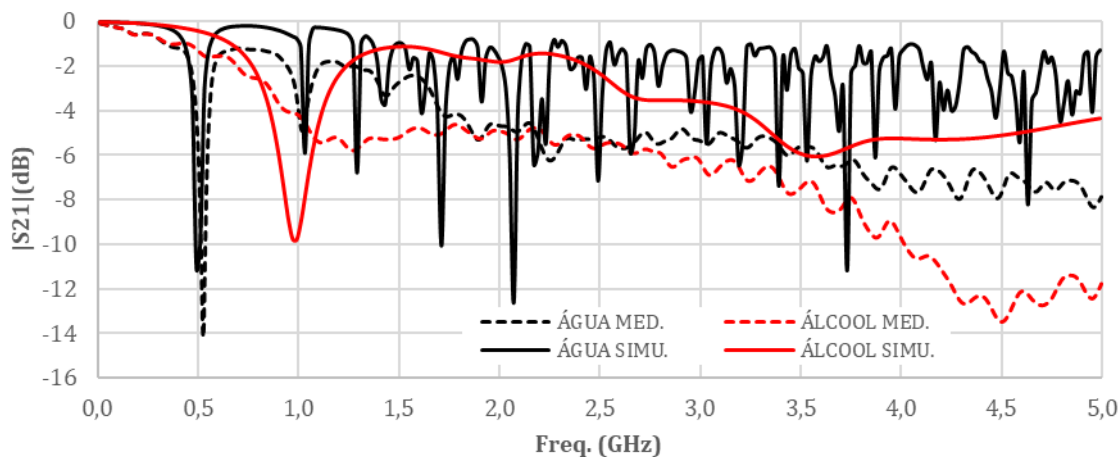


Fig. 36 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 3 com 100% água e 100% álcool.

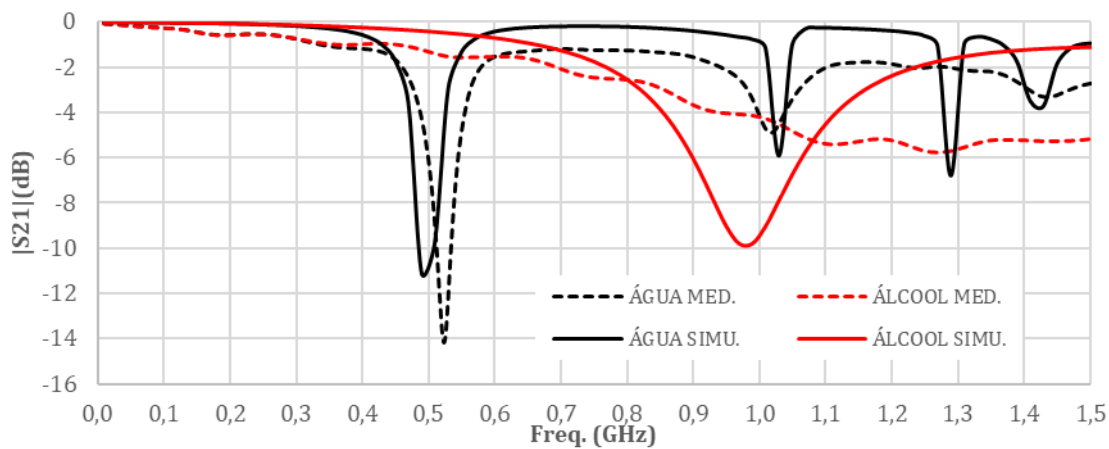


Fig. 37 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 3 com 100% água e 100% álcool.

Na Tabela IX é apresentado um resumo das frequências ressonantes do sensor DGS-matrioska 3.

Tabela IX – Frequências Ressonantes do Sensor DGS-matrioska 3

	$f_{resMed.}$	$f_{resSimu.}$	$f_{resCalc.}$	<i>diferença%</i>
vazio	2,13 GHz	2,11 GHz	2,25 GHz	0,9%
água	0,52 GHz	0,49 GHz	–	5,7%
álcool	1,25 GHz	0,99 GHz	–	20,8%

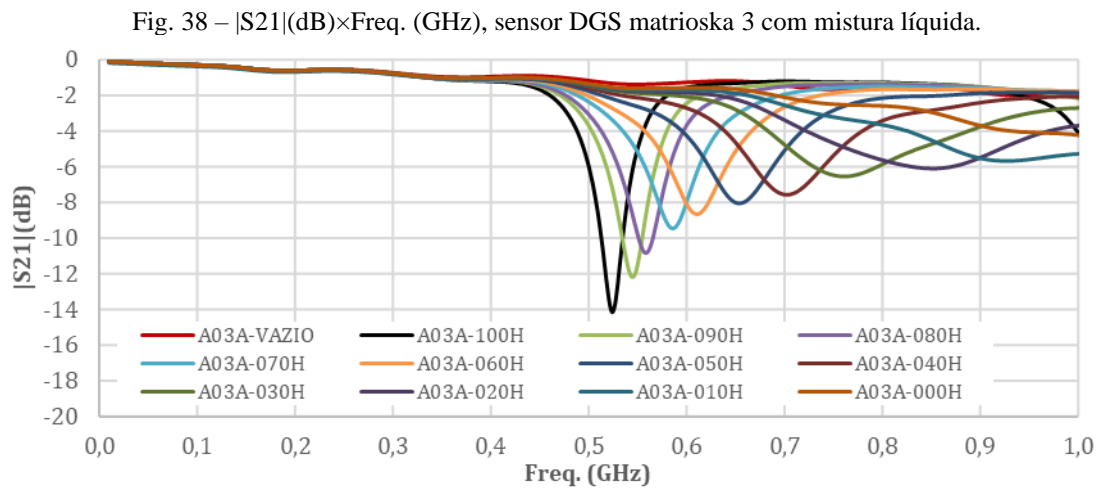
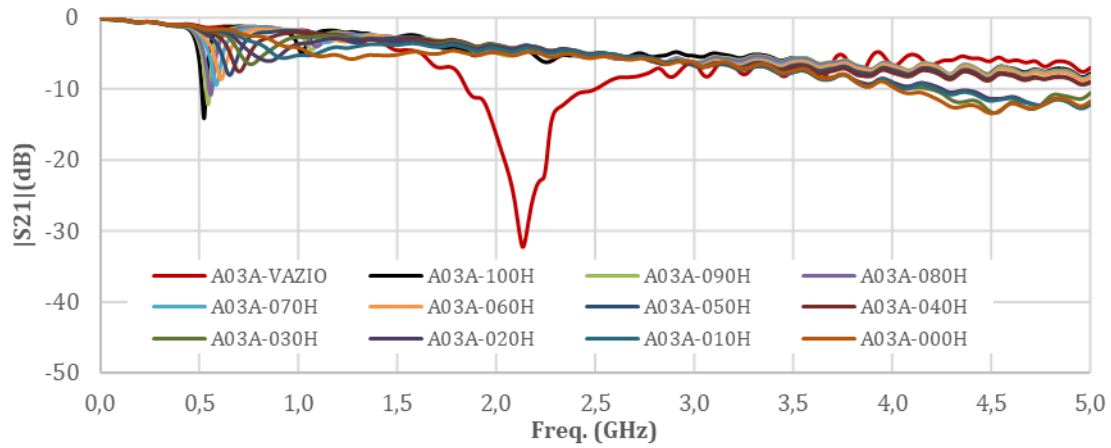


Fig. 39 - $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 3 com mistura líquida.

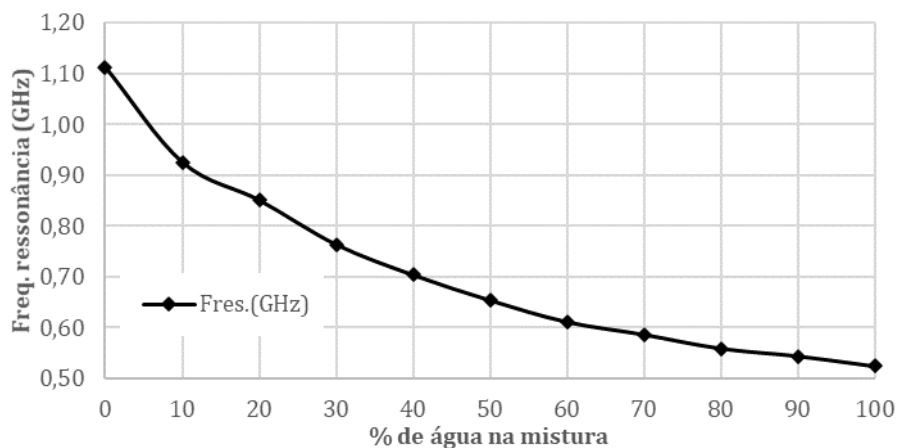


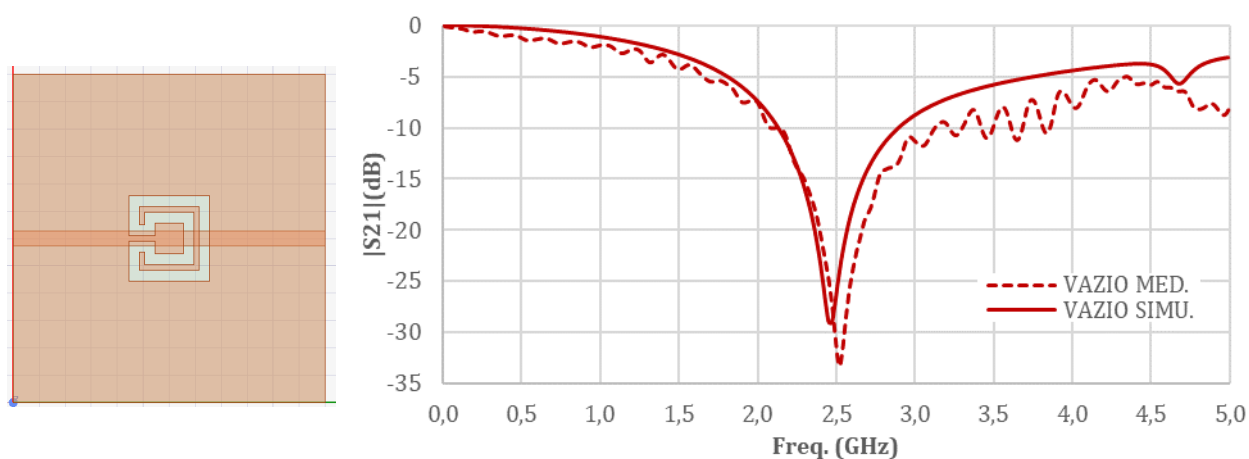
Fig. 40 - Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 3.

Veja na Tabela X os principais parâmetros utilizados na análise do sensor DGS-matrioska 3.

Tabela X – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 3

% Água	f_r (GHz)	$Q(-3\text{ dB})$	$Q_A(\text{dB/GHz})$	BW(GHz)
0	1,1128			
10	0,9257			
20	0,8508	1,84	13,21	0,46
30	0,7635	2,64	22,58	0,29
40	0,7036	3,28	35,26	0,21
50	0,6537	3,74	46,10	0,17
60	0,6113	3,95	55,97	0,15
70	0,5863	4,35	70,22	0,13
80	0,5589	5,09	98,75	0,11
90	0,5439	5,59	125,20	0,10
100	0,5240	6,18	166,94	0,08

O sensor DGS-matrioska 4 foi desenvolvido com uma única diferença em relação ao sensor 3, a largura das fitas que formam os anéis concêntricos $w_{ma} = 2,0\text{ mm}$. Para o sensor calibrado e caracterizado como vazio, verificou-se uma boa concordância entre as respostas em frequência numéricas e experimentais com diferença de 1,9%, Figura 41 e um comportamento semelhante ao sensor 2 para 100% de água destilada e resultados não tão bons para 100% de álcool isopropílico, Figuras 42 e 43. Da mesma forma que os sensores anteriores, o sensor 4 não conseguiu determinar os percentuais de água destilada menores que 20%, como pode ser observado nas Figuras 44, 45 e 46.

Fig. 41 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 4 vazio, $w_{ma1} = 15,5\text{ mm}$, $w_{ma} = 2,0\text{ mm}$.

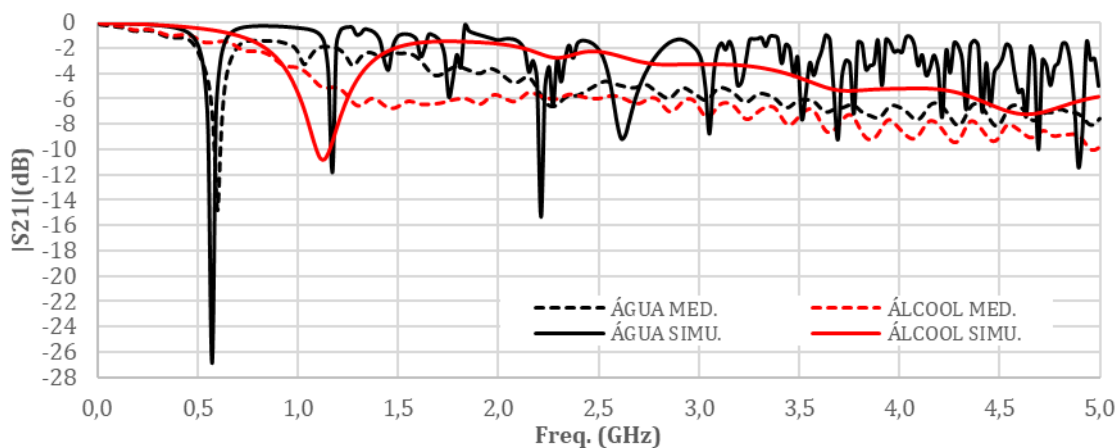


Fig. 42 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 4 com 100% água e 100% álcool.

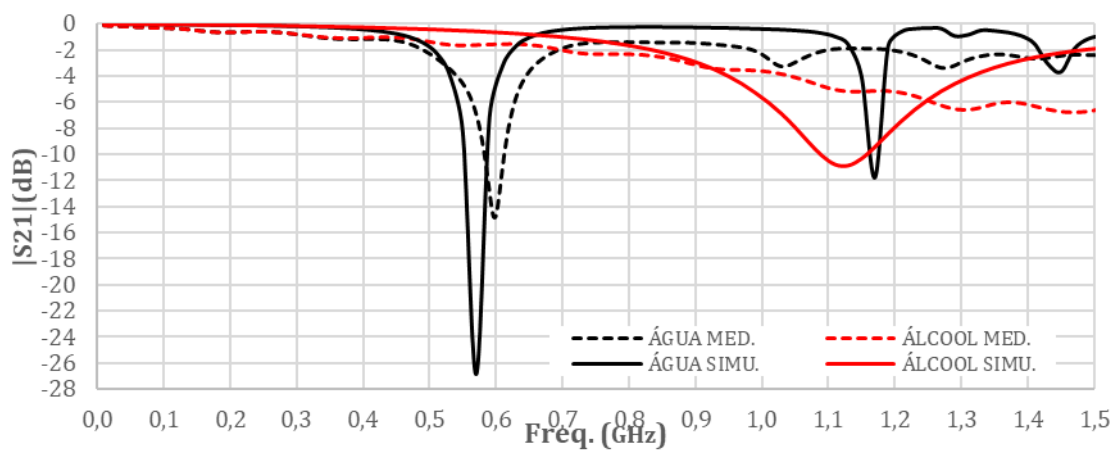


Fig. 43 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 4 com 100% água e 100% álcool.

Na Tabela XI é apresentado um resumo das frequências ressonantes do sensor DGS-matrioska 4 e os principais parâmetros analisados podem ser visto nas Tabela XII.

Tabela XI – Frequências Ressonantes do Sensor 4

	$f_{resMed.}$	$f_{resSimu.}$	$f_{resCalc.}$	<i>diferença%</i>
vazio	2,52 GHz	2,47 GHz	2,35 GHz	1,9%
água	0,59 GHz	0,57 GHz	–	3,3%
álcool	1,31 GHz	1,13 GHz	–	13,7%

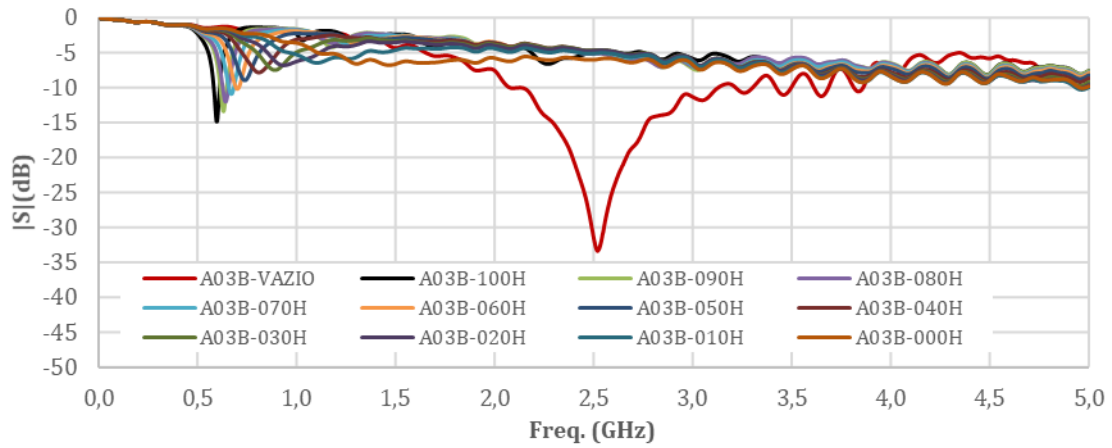


Fig. 44 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 4 com mistura líquida.

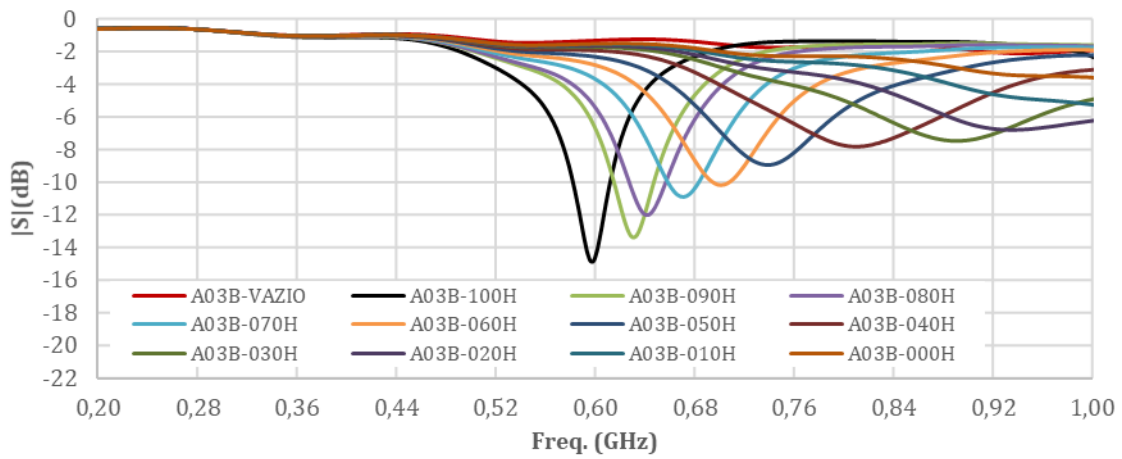


Fig. 45 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 4 com mistura líquida.

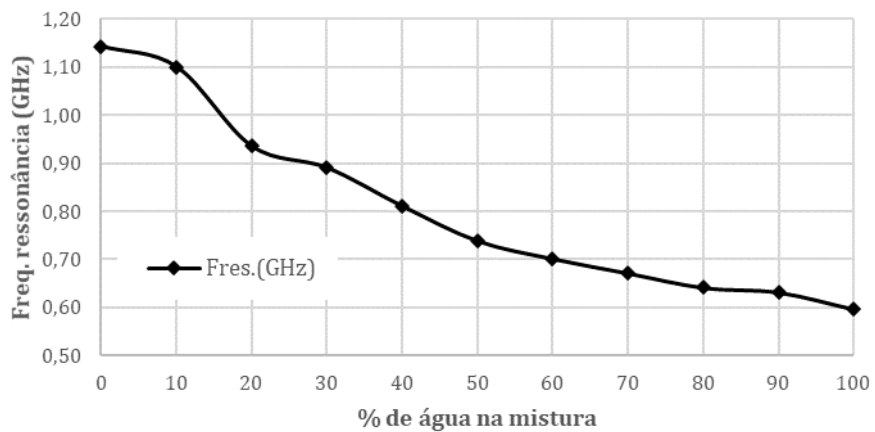


Fig. 46 – Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 4.

Tabela XII – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 4

% Água	f_r (GHz)	$Q(-3\text{ dB})$	$Q_A(\text{dB/GHz})$	BW(GHz)
0	1,1427			
10	1,1003			
20	0,9356			
30	0,8907	1,41	11,80	0,63
40	0,8109	2,15	20,77	0,38
50	0,7385	2,85	34,47	0,26
60	0,7011	3,35	48,59	0,21
70	0,6712	3,69	59,86	0,18
80	0,6412	3,84	71,88	0,17
90	0,6313	3,95	83,84	0,16
100	0,5963	4,27	106,20	0,14

Nas Figuras 47-75 são apresentados os resultados obtidos para os demais sensores DGS-matrioska. Esses resultados serão demonstrados a partir dos parâmetros resumidos nas Tabelas XIV, XVI, XVIII, XX e XXII.

O sensor 5 é semelhante ao sensor 2, porém com um anel matrioska aberto. Comprando os resultados da Tabela XIII com o da VII, verifica-se a redução da frequência de ressonância para aproximadamente a metade, em relação ao sensor 2.

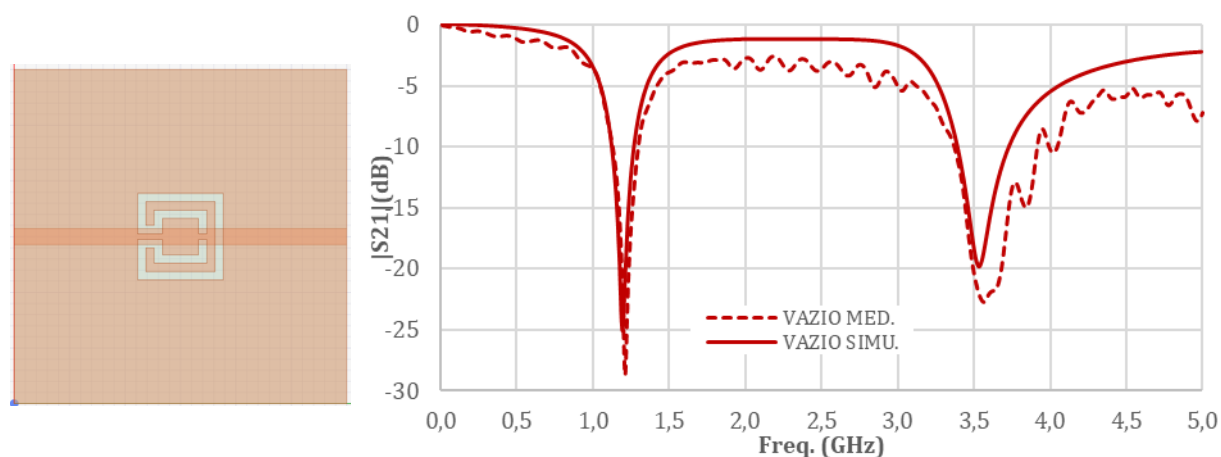


Fig. 47 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 5 vazio, $w_{ma1} = 15,5\text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5\text{ mm}$, aberto.

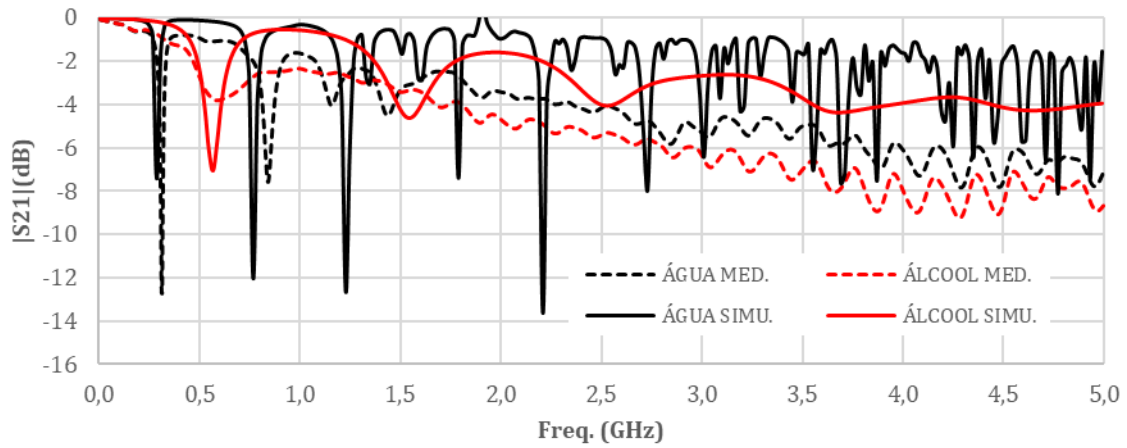


Fig. 48 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 5 com 100% água e 100% álcool.

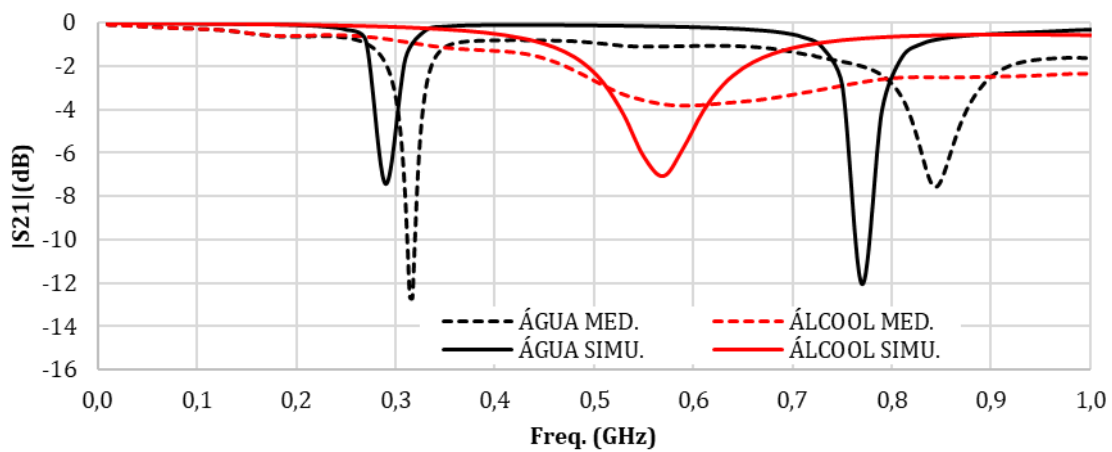


Fig. 49 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 5 com 100% água e 100% álcool.

Tabela XIII – Frequências Ressonantes do Sensor 5

	$f_{resMed.}$	$f_{resSimu.}$	$f_{resCalc.}$	<i>diferença%</i>
vazio	1,20 GHz	1,19 GHz	1,15 GHz	0,8%
água	0,31 GHz	0,29 GHz	–	6,4%
álcool	0,59 GHz	0,57 GHz	–	3,4%

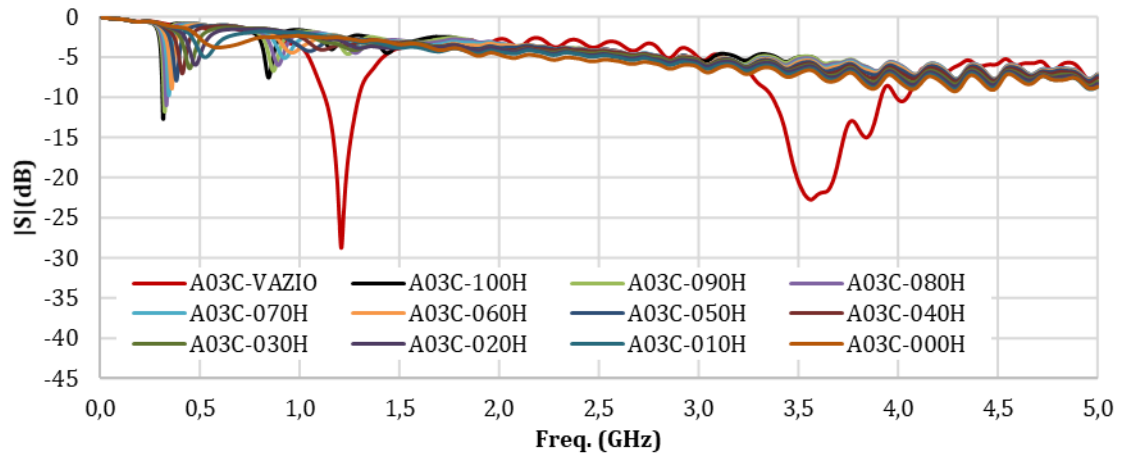


Fig. 50 – $|S_{21}|$ (dB)×Freq. (GHz), sensor DGS matrioska 5 com mistura líquida.

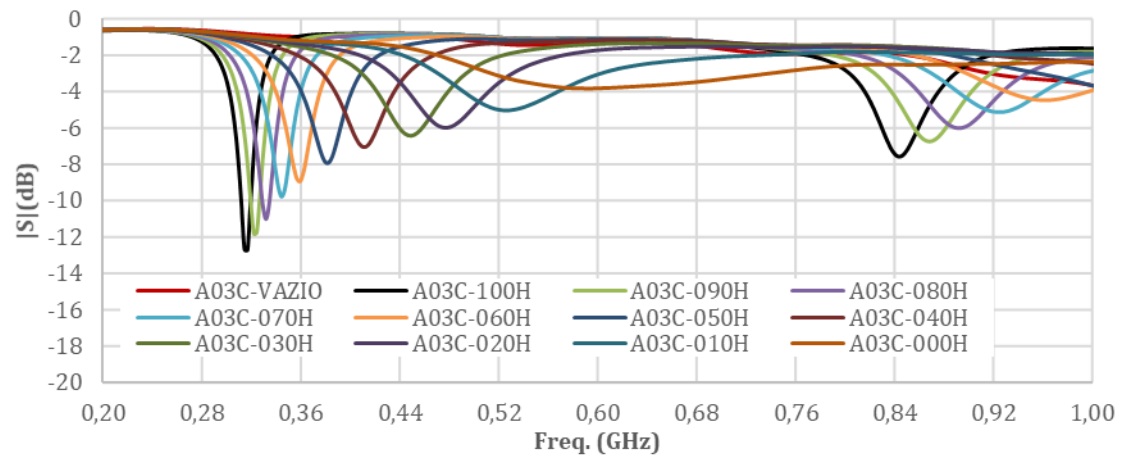


Fig. 51 – $|S_{21}|$ (dB)×Freq. (GHz), sensor DGS matrioska 5 com mistura líquida.

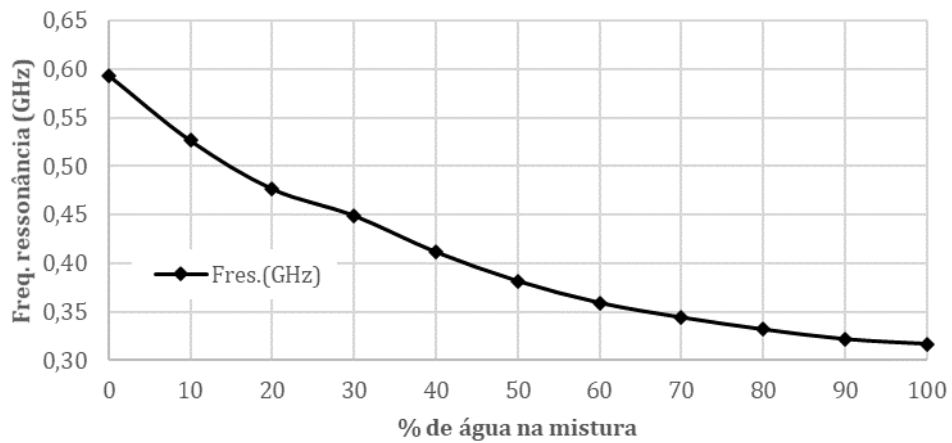


Fig. 52 – Freq. Ressonância (GHz)×% de água na mistura, sensor DGS matrioska 5.

Tabela XIV – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 5

% Água	f_r (GHz)	$Q(-3\text{ dB})$	$Q_A(\text{dB/GHz})$	BW(GHz)
0	0,5938	2,64	17,06	0,22
10	0,5265	4,06	38,80	0,13
20	0,4766	4,90	61,56	0,10
30	0,4491	5,29	75,79	0,08
40	0,4117	5,89	100,94	0,07
50	0,3818	6,65	138,40	0,06
60	0,3593	7,20	179,18	0,05
70	0,3443	8,12	230,60	0,04
80	0,3319	8,87	294,15	0,04
90	0,3219	9,22	337,98	0,03
100	0,3169	9,77	391,76	0,03

Destaque-se aqui que o sensor 5 foi capaz de detectar os teores de água destilada de 0% a 100%.

Analogamente ao sensor 5, o sensor 6 é semelhante ao sensor 3, porém com um anel matrioska aberto. Comparando os resultados da Tabela XV com o da IX, verifica-se a redução da frequência de ressonância para aproximadamente a metade, em relação ao sensor 3.

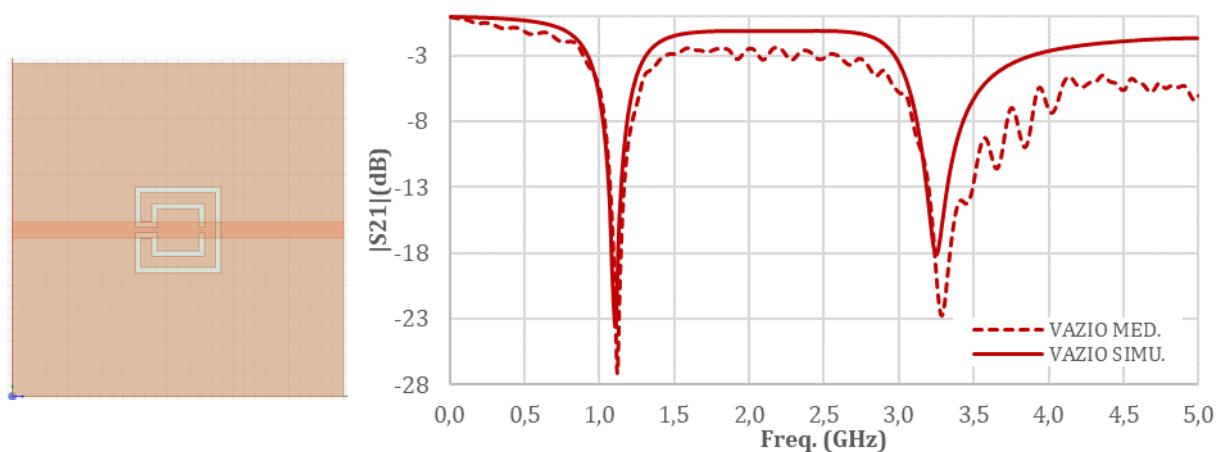


Fig. 53 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 6 vazio, $w_{ma1} = 15,5\text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0\text{ mm}$, aberto.

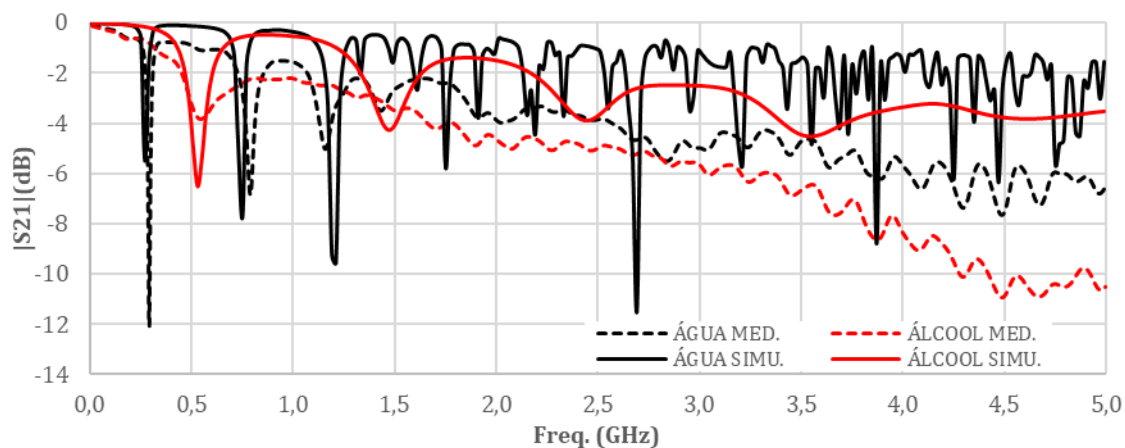


Fig. 54 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 6 com 100% água e 100% álcool.

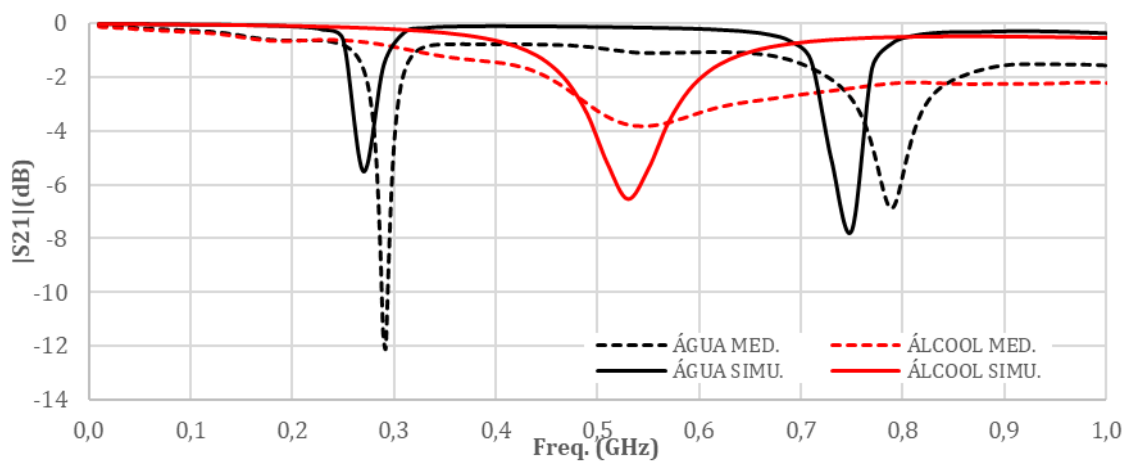


Fig. 55 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 6 com 100% água e 100% álcool.

Tabela XV – Frequências Ressonantes do Sensor 6

	$f_{res_{Med.}}$	$f_{res_{Simu.}}$	$f_{res_{Calc.}}$	$diferença\%$
vazio	1,12 GHz	1,11 GHz	1,12 GHz	0,9%
água	0,29 GHz	0,27 GHz	–	6,9%
álcool	0,54 GHz	0,53 GHz	–	1,8%

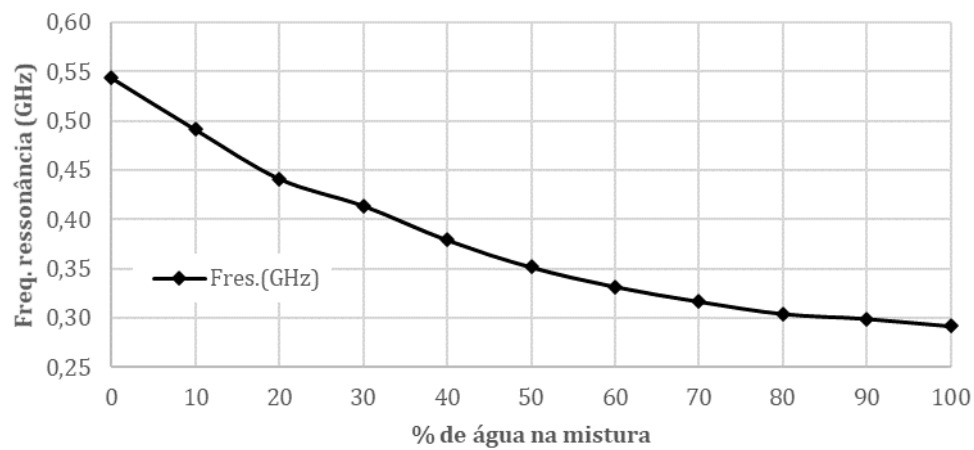
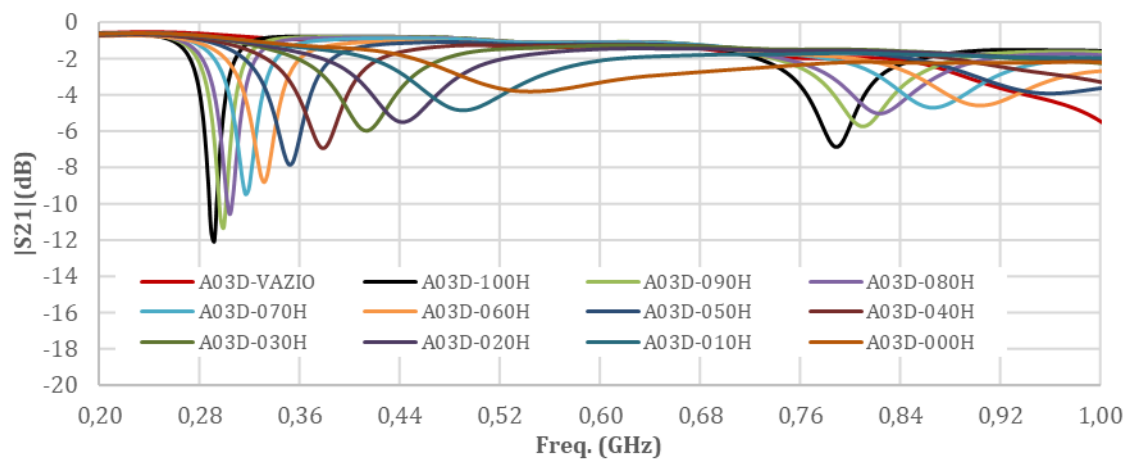
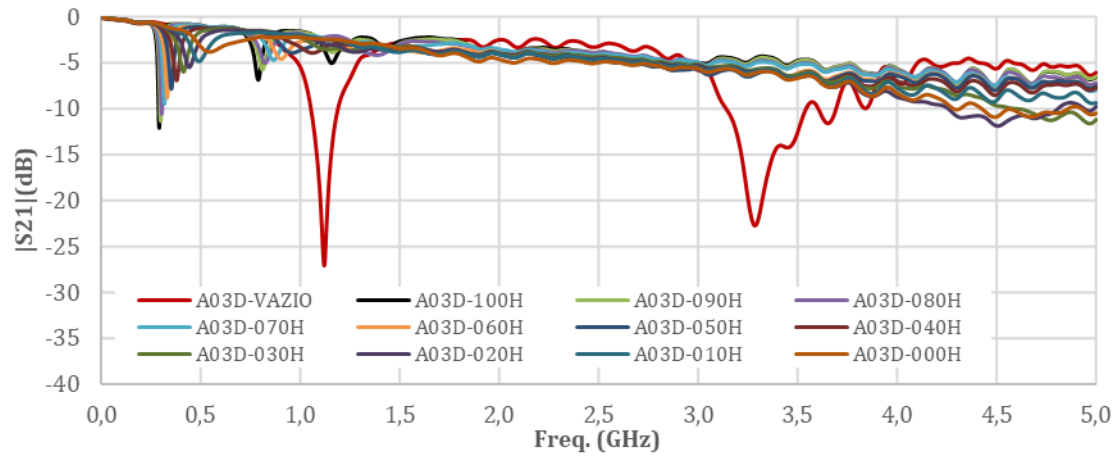


Tabela XVI – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 6

% Água	f_r (GHz)	$Q(-3\text{ dB})$	$Q_A(\text{dB/GHz})$	BW(GHz)
0	0,5439	3,89	27,33	0,14
10	0,4915	4,69	46,31	0,10
20	0,4416	5,36	66,82	0,08
30	0,4142	5,93	85,57	0,07
40	0,3793	6,61	120,96	0,06
50	0,3518	7,42	139,92	0,07
60	0,3319	7,83	207,72	0,04
70	0,3169	9,07	271,41	0,03
80	0,3044	10,17	353,31	0,03
90	0,2994	10,91	412,61	0,03
100	0,2919	10,64	439,48	0,03

Analogamente ao sensor 5, o sensor foi capaz de detectar os teores de água destilada de 0% a 100%.

Concluindo a análise de sensores com um anel matrioska aberto, o sensor 7 é semelhante ao sensor 4, porém com o anel aberto.

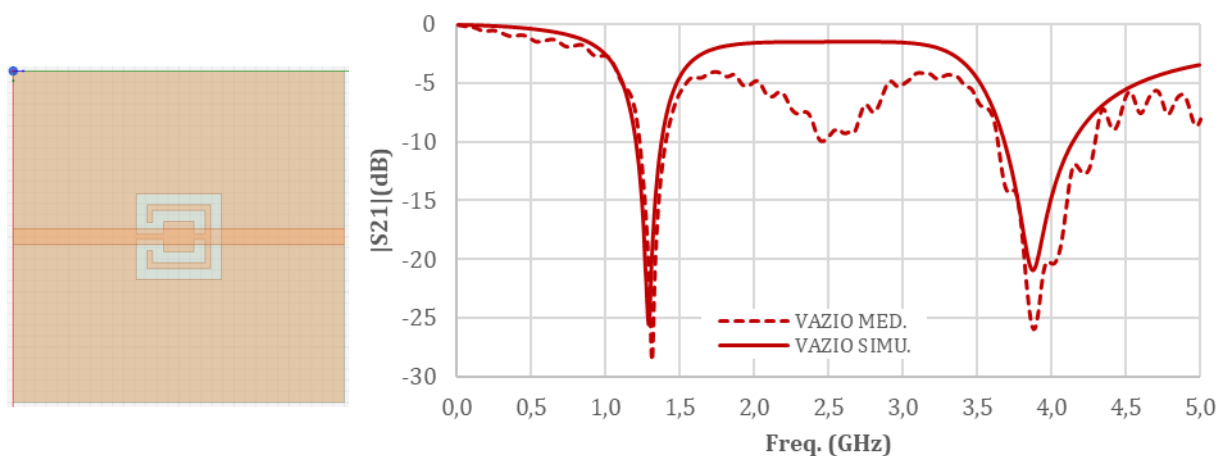


Fig. 59 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 7 vazio, $w_{ma1} = 15,5\text{ mm}$, $w_{ma} = 2,0\text{ mm}$, aberto.

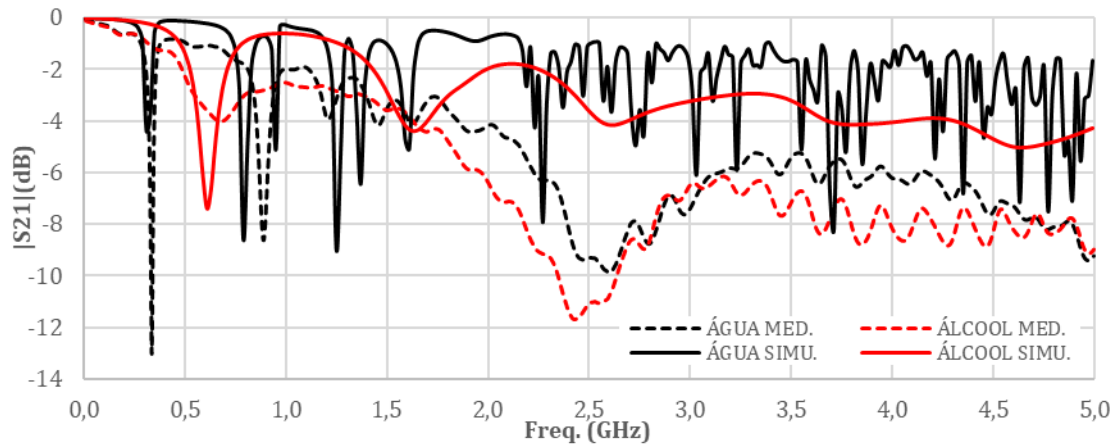


Fig. 60 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 7 com 100% água e 100% álcool.

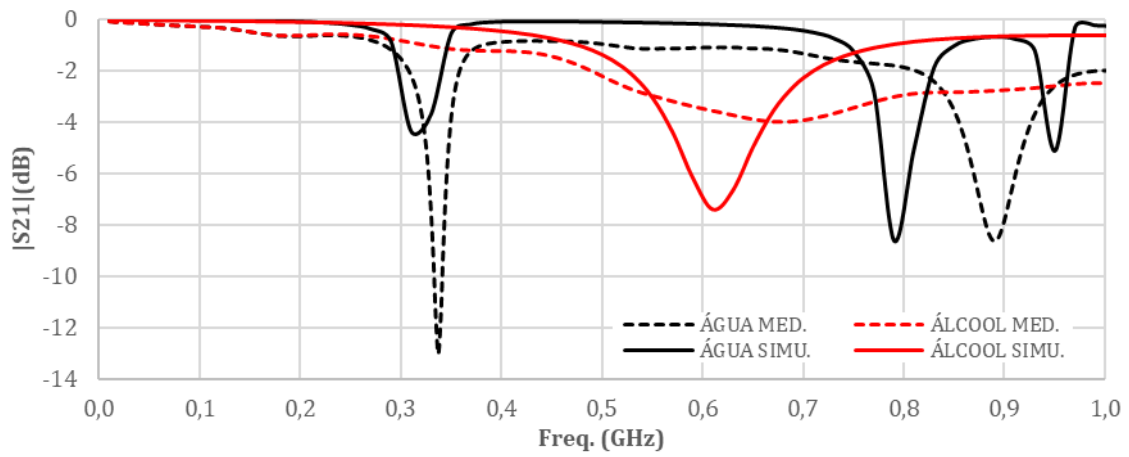


Fig. 61 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 7 com 100% água e 100% álcool.

Tabela XVII – Frequências Ressonantes do Sensor 7

	$f_{res_{Med.}}$	$f_{res_{Simu.}}$	$f_{res_{Calc.}}$	$diferença\%$
vazio	1,12 GHz	1,11 GHz	1,17 GHz	0,9%
água	0,33 GHz	0,31 GHz	–	6,0%
álcool	0,68 GHz	0,61 GHz	–	10,2%

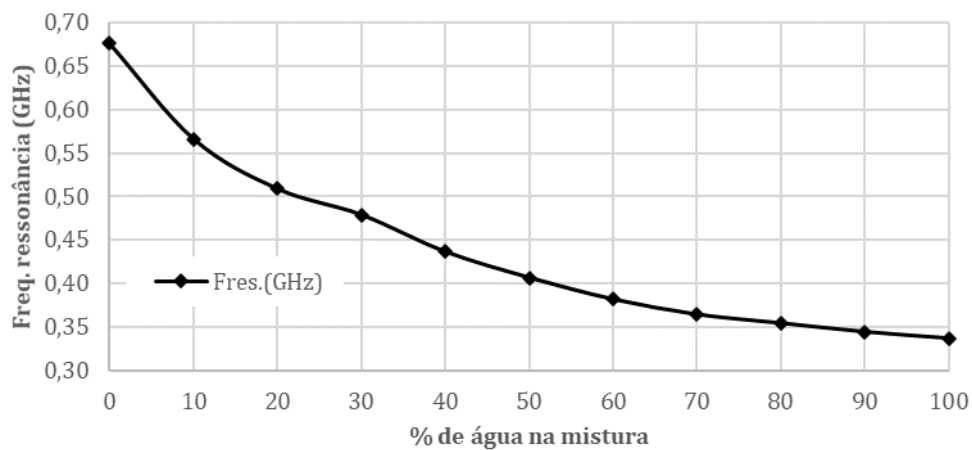
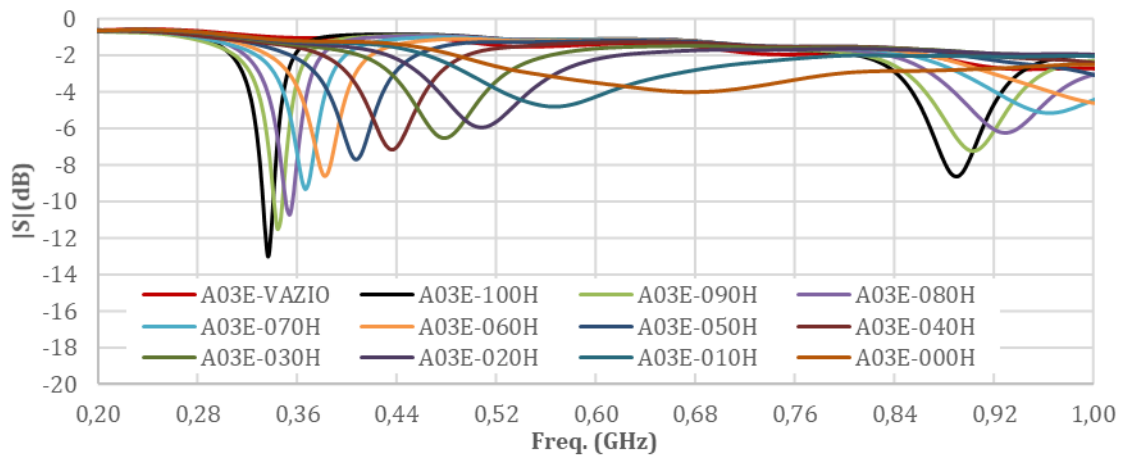
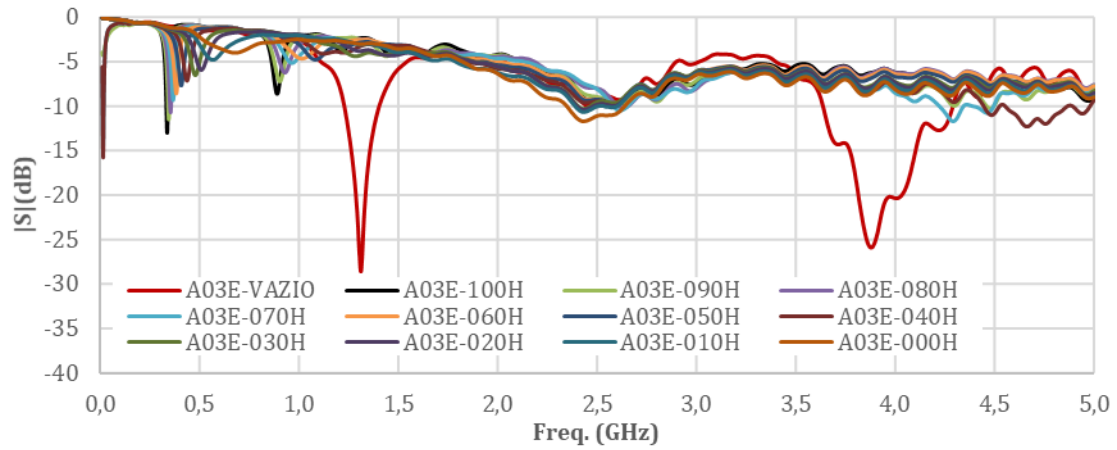


Tabela XVIII – Parâmetros do sensor DGS-matroska 7

% Água	f_r (GHz)	$Q(-3\text{ dB})$	$Q_A(\text{dB/GHz})$	BW(GHz)
0	0,6762	2,79	16,57	0,24
10	0,5664	3,44	29,19	0,16
20	0,5090	4,64	54,13	0,11
30	0,4791	5,19	70,71	0,09
40	0,4366	6,03	98,99	0,07
50	0,4067	6,27	118,52	0,06
60	0,3818	7,29	163,99	0,05
70	0,3643	7,68	188,11	0,05
80	0,3543	8,35	252,64	0,04
90	0,3443	8,62	288,10	0,04
100	0,3368	9,64	372,64	0,03

Analogamente aos dois sensores previamente analisados, o sensor 7 foi capaz de detectar os teores de água destilada de 0% a 100%.

O sensor 8 apresenta dois anéis matroska e a sua resposta em frequência é mostrada na Fig. 65.

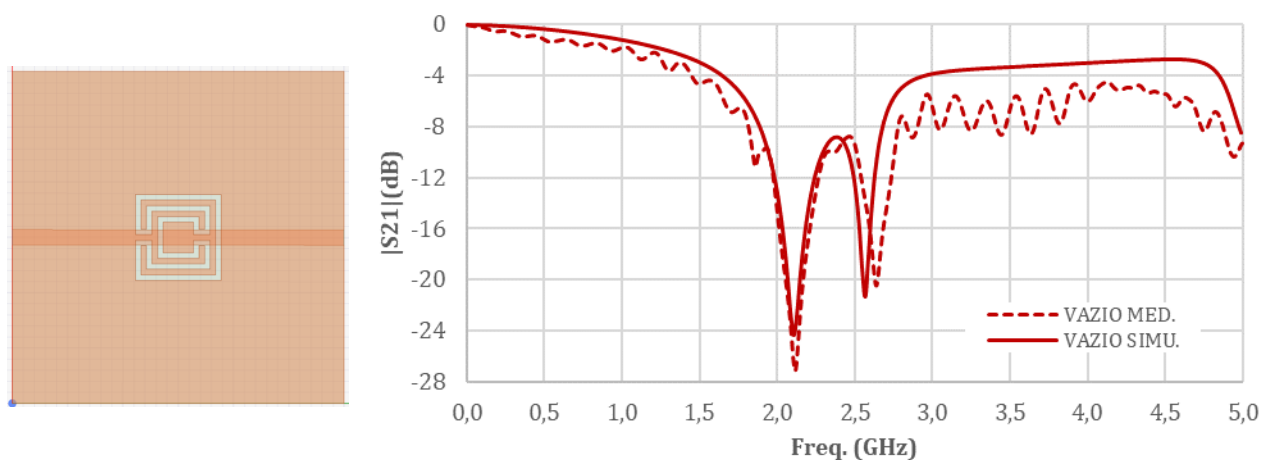


Fig. 65 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matroska 8 vazio, $w_{ma1} = 15,5\text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0\text{ mm}$.

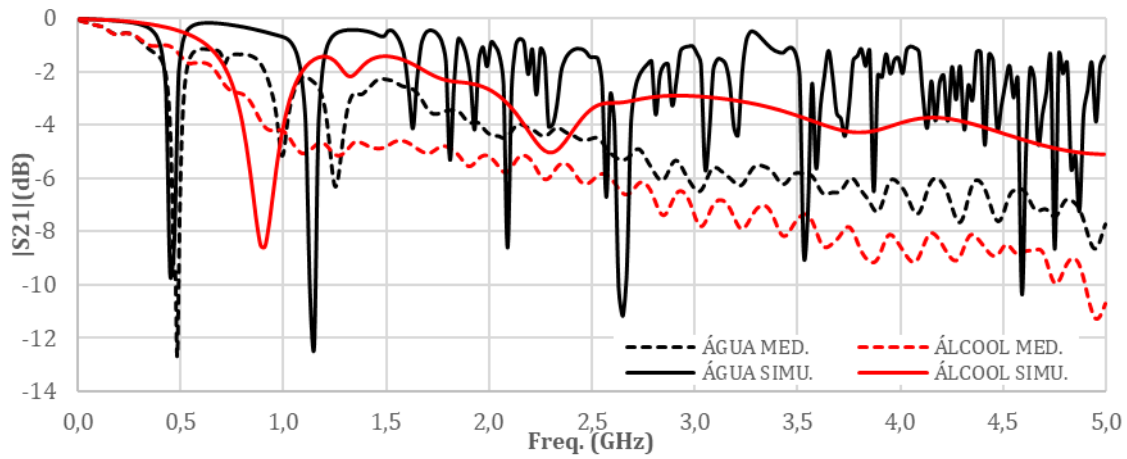


Fig. 66 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 8 com 100% água e 100% álcool.

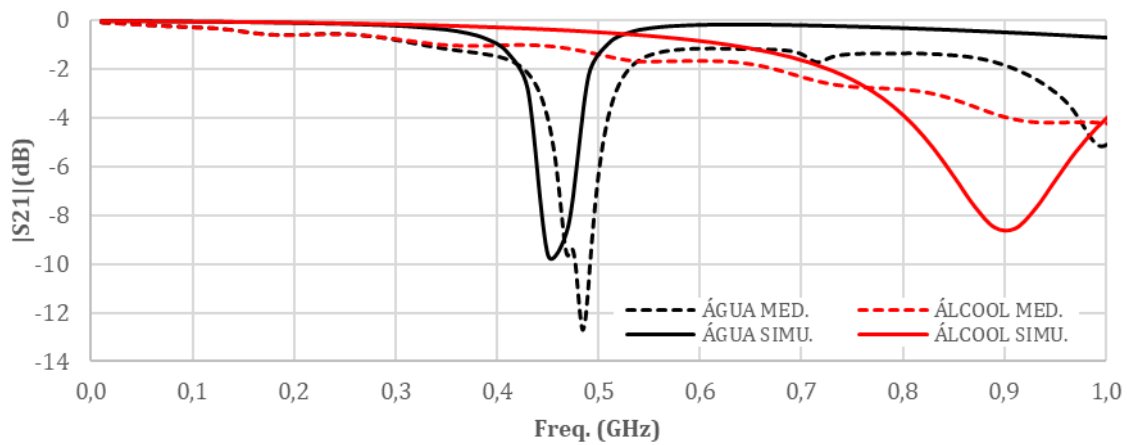


Fig. 67 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 8 com 100% água e 100% álcool.

Tabela XIX – Frequências Ressonantes do Sensor 8

	$f_{res_{Med.}}$	$f_{res_{Simu.}}$	$f_{res_{Calc.}}$	<i>diferença%</i>
vazio	2,12 GHz	2,11 GHz	1,93 GHz	0,4%
água	0,48 GHz	0,45 GHz	–	6,2%
álcool	1,1 GHz	0,91 GHz	–	17,2%

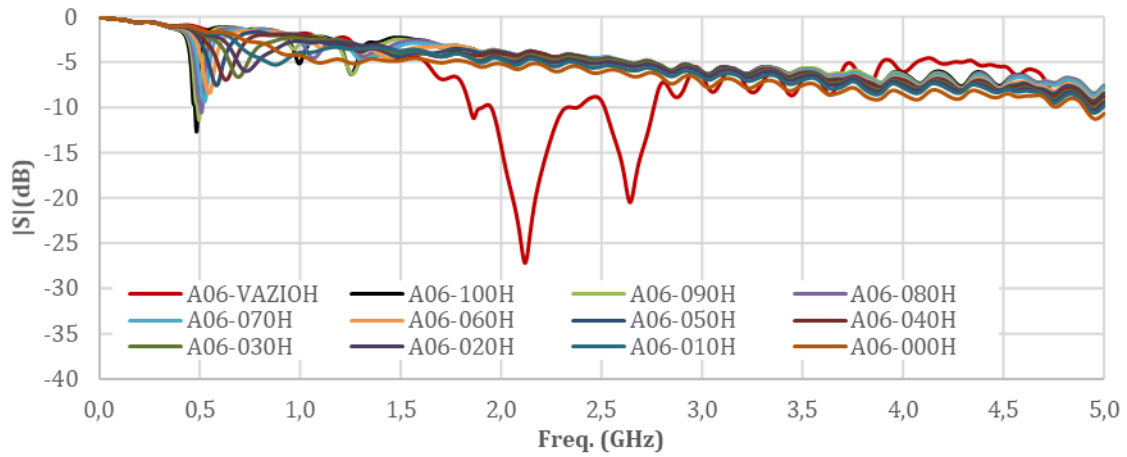


Fig. 68 – $|S_{21}|$ (dB)×Freq. (GHz), sensor DGS matrioska 8 com mistura líquida.

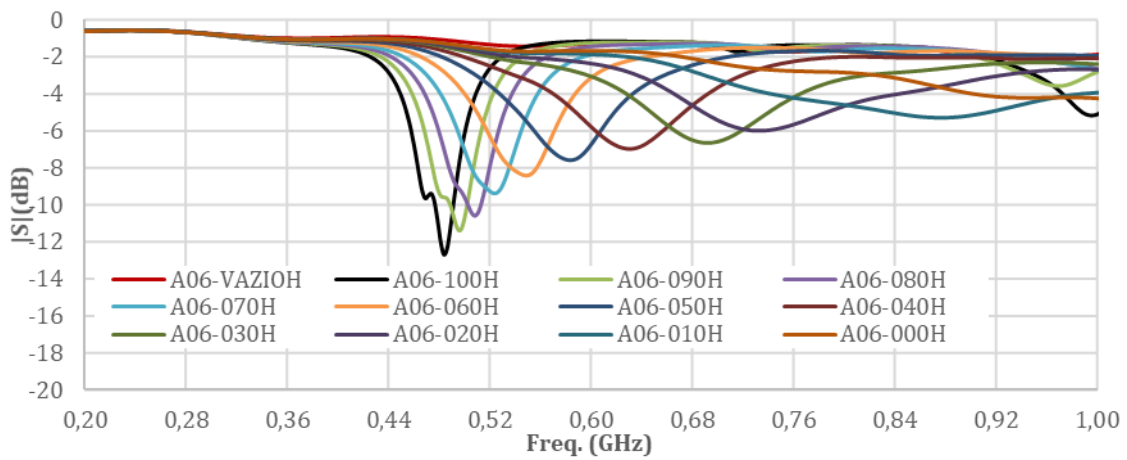


Fig. 69 – $|S_{21}|$ (dB)×Freq. (GHz), sensor DGS matrioska 8 com mistura líquida.

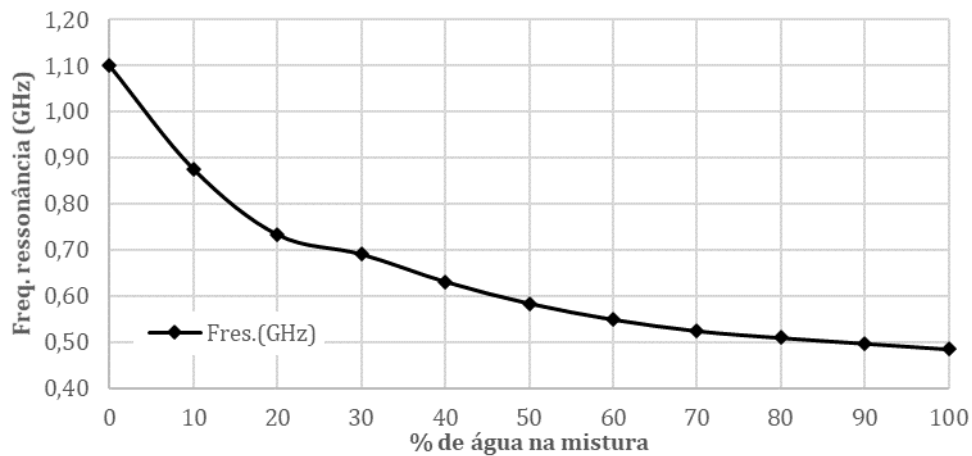


Fig. 70 – Freq. Ressonância (GHz)×% de água na mistura, sensor DGS matrioska 8.

Tabela XX – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 8

% Água	f_r (GHz)	$Q(-3\text{ dB})$	$Q_A(\text{dB/GHz})$	BW(GHz)
0	1,1003			
10	0,8758			
20	0,7336	2,56	20,89	0,29
30	0,6911	3,18	30,63	0,22
40	0,6313	3,56	39,36	0,18
50	0,5839	3,90	50,69	0,15
60	0,5489	4,78	73,32	0,11
70	0,5240	5,39	96,41	0,10
80	0,5090	5,83	121,20	0,09
90	0,4965	6,22	142,71	0,08
100	0,4841	6,47	169,59	0,07

De maneira semelhante os demais sensores com anel fechado, o sensor 8 não conseguiu detectar os teores de 0% e 10% de água na mistura.

O sensor 9 é semelhante ao sensor 8, porém com o anel matrioska aberto, tendo sido capaz de detectares teores de água destilada de 0% a 100%.

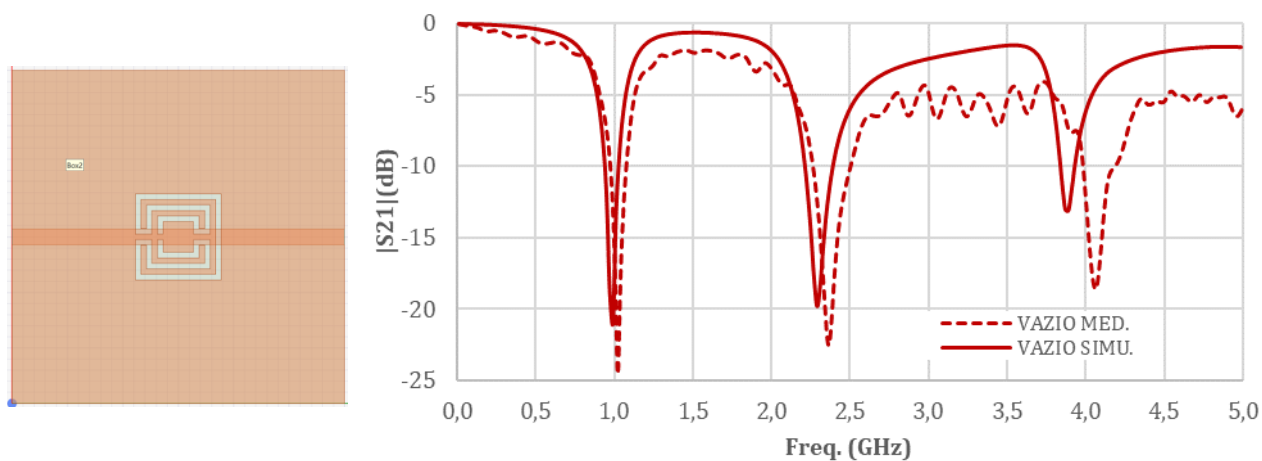


Fig. 71 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 9 vazio, $w_{ma1} = 15,5\text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0\text{ mm}$, aberto

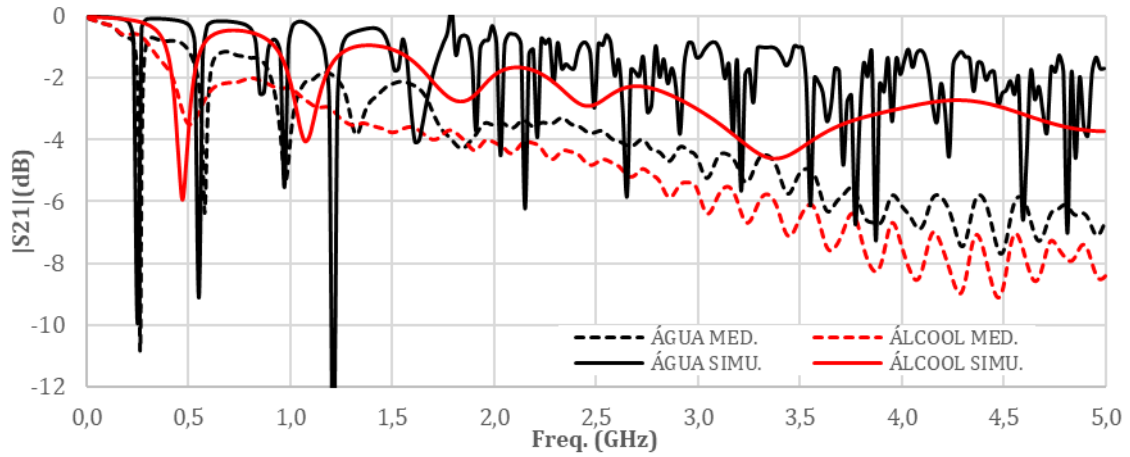


Fig. 72 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 9 com 100% água e 100% álcool.

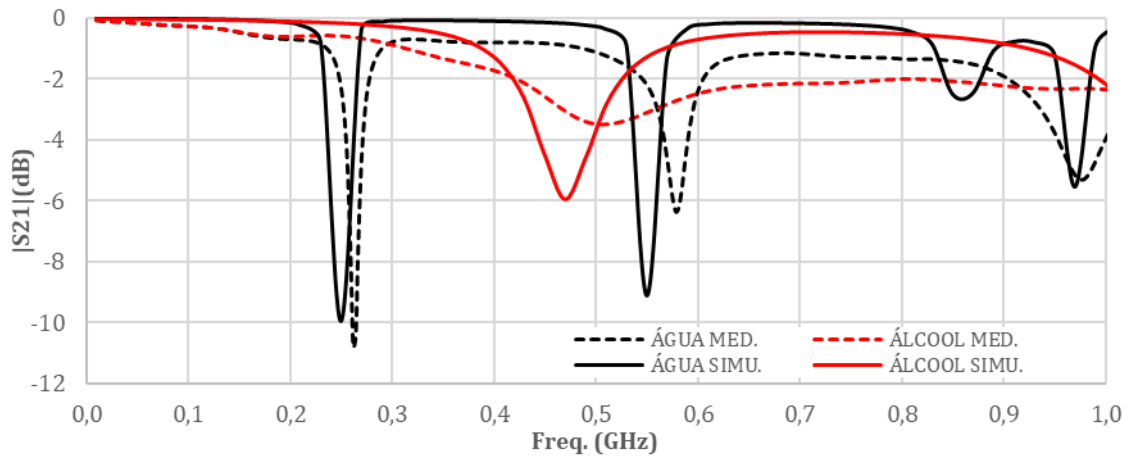


Fig. 73 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 9 com 100% água e 100% álcool.

Tabela XXI – Frequências Ressonantes do Sensor 9

	$f_{res_{Med.}}$	$f_{res_{simu.}}$	$f_{res_{calc.}}$	<i>diferença%</i>
vazio	1,0 GHz	0,99 GHz	0,96 GHz	1,0%
água	0,26 GHz	0,25 GHz	–	3,8%
álcool	0,5 GHz	0,47 GHz	–	6,0%

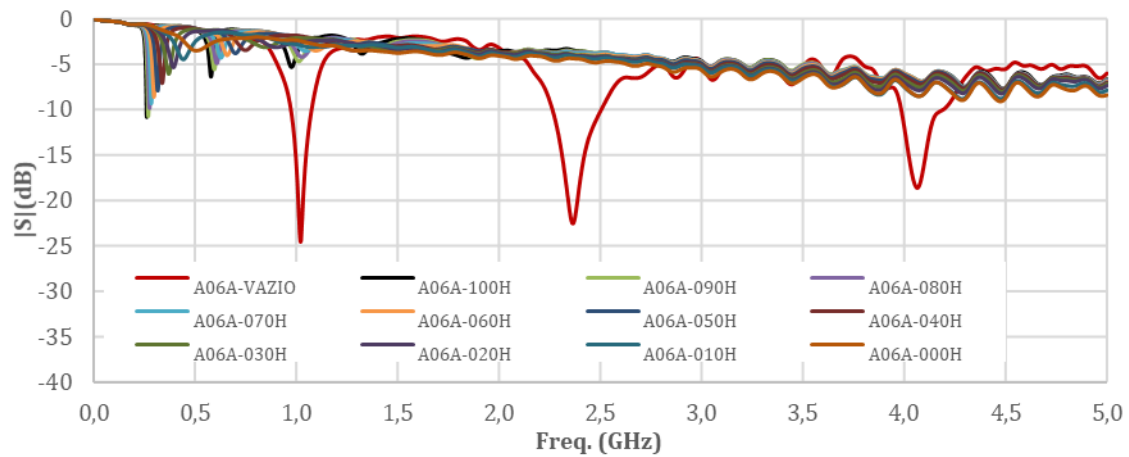


Fig. 74 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 9 com mistura líquida.

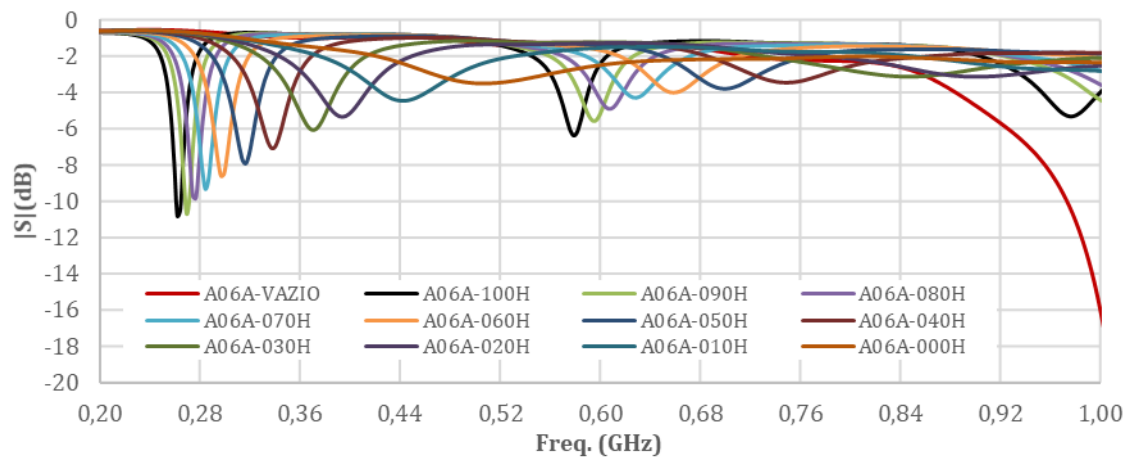


Fig. 75 – $|S_{21}|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, sensor DGS matrioska 9 com mistura líquida.

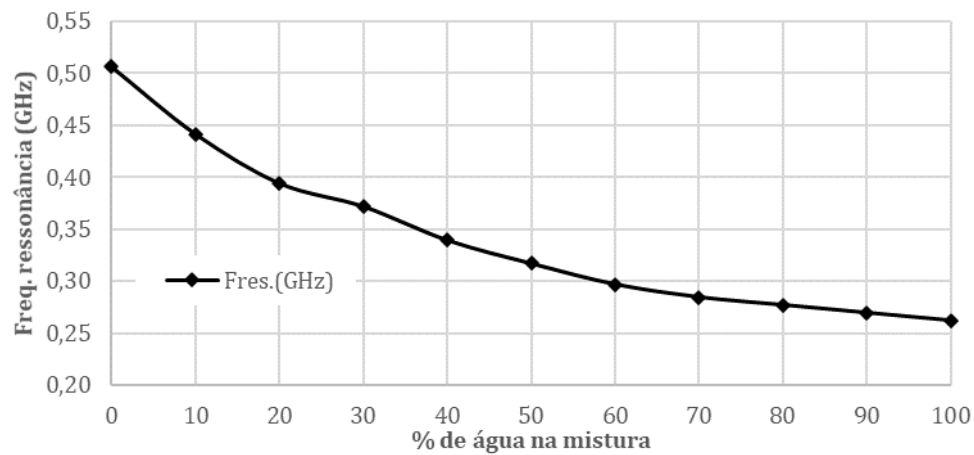


Fig. 76 – Freq. Ressonância (GHz) \times % de água na mistura, sensor DGS matrioska 9.

Tabela XXII – Parâmetros do sensor DGS-matrioska 9

% Água	f_r (GHz)	$Q(-3\text{ dB})$	$Q_A(\text{dB/GHz})$	BW(GHz)
0	0,5065	5,49	37,98	0,09
10	0,4416	5,71	57,71	0,08
20	0,3942	6,58	89,33	0,06
30	0,3718	7,10	115,65	0,05
40	0,3393	8,00	166,62	0,04
50	0,3169	8,47	211,52	0,04
60	0,2969	9,92	287,38	0,03
70	0,2845	10,37	339,78	0,03
80	0,2770	12,34	437,57	0,02
90	0,2695	12,00	476,47	0,02
100	0,2620	11,67	480,94	0,02

De maneira geral, os nove sensores desenvolvidos, seus resultados numéricos e experimentais apresentaram boa concordância. As equações iniciais de projeto propostas apresentaram resultados satisfatórios, quando comparado os valores obtidos nas medições. Os sensores com anel aberto conseguiram detectar todos os níveis de água destilada na mistura, destacando-se o sensor 9 que apresentou um maior Q_A para 0% de água destilada, enquanto os sensores com anel fechado detectaram teor a partir de 20% de água destilada. A respeito dos sensores com anel fechado, o sensor 1 foi o que apresentou um maior Q_A para 20% de água destilada.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, inicialmente foram desenvolvidos e caracterizados sensores DGS utilizando a geometria matrioska com dois anéis concêntricos retangulares e sensores usando a geometria haltere, para analisar o desempenho do sensor proposto e realizar comparação com sensor DGS de outra geometria, assim confirmando as características da geometria matrioska. Quando aplicados na mesma faixa de frequência foi confirmada a miniaturização do sensor matrioska e levando em consideração a dimensão ocupada pelos sensores matrioska e haltere, foi confirmado maior seletividade. Também foram desenvolvidos e caracterizados sensores baseados na geometria matrioska para diferentes configurações e com até três anéis concêntricos, uma estratégia diferente em relação a trabalhos anteriores.

Foi realizada uma revisão bibliográfica relativa ao projeto abrangendo principalmente, os conceitos básicos da geometria matrioska e dos sensores DGSs, aplicações, caracterização numérica e experimental e realizando a comparação dos resultados obtidos. Na seção 3.1, são demonstrados os resultados numéricos e simulados, a comparação entre sensor DGS com geometria haltere e matrioska, incluindo a aplicabilidade das equações iniciais de projeto e confirmação das características da geometria matrioska. Os resultados experimentais para diferentes configurações da geometria matrioska aplicado no sensor DGS são apresentados na seção 3.2.

Nove sensores foram fabricados e caracterizados numericamente e experimentalmente, sete com dois anéis concêntricos retangulares e dois com três anéis concêntricos retangulares. Além disso, os sensores com anel aberto conseguiram detectar todos os níveis de água destilada na mistura, destacando-se o sensor 9 que apresentou um maior Q_A para 0% de água destilada e maior fator de qualidade. Os protótipos desenvolvidos demonstraram bons resultados simulados e medidos.

Como proposta de trabalhos futuros, propõe-se que sejam revistos os cabos utilizados nas conexões, a realização de medições com outros tipos de materiais, a caracterização das amostras a serem utilizadas e utilizar outros formatos (circular, triangular, hexagonal). Além disso, determinar o teor de álcool em outros tipos de misturas líquidas com o sensor matrioska aberto.

REFERÊNCIAS

- [1] Motorola. “Internet das Coisas Industrial para Aeroportos Inteligentes,” Disponível em: <https://www.motorolasolutions.com/content/dam/msi/docs/XL-PT/industrial-internet-of-things-for-smart-airports-PT.pdf/>. Acesso em: 10 março 2022.
- [2] Jacob Fraden, **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications**. 4. ed. New York: Springer, 2010.
- [3] Electronics Hub. “O que é um Sensor? Diferentes tipos de sensores e suas aplicações,” Disponível em: <https://www.electronicshub.org/different-types-sensors/>. Acesso em: 11 abril 2022.
- [4] Sensor Market Size, Share, Industry Demand, Global Analysis, 2027 _ MRFR Disponível: https://www.marketresearchfuture.com/sample_request/8197
- [5] AXZON “We bring intelligence to all end points”. Disponível: <https://www.axzon.com/products.html>. Acessado em: 02 de abril de 2022.
- [6] 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>.
- [7] Hillner de Paiva Almeida Ferreira, Matrioska: Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2014.
- [8] Alfredo G. Neto; Adaildo G. DAssunção Junior; Jefferson Costa e Silva; Josiel do N. Cruz; João Batista de O. Silva; Nieremberg José P. de L. Ramos, “Multiband frequency selective surface with open matryoshka elements,” in 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, Portugal, May 13–17, 2015, pp. 1–5.
- [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, J. N. de Carvalho, J. G. de O. Mariano, T. R. de Sousa, “Análise da aplicação da geometria matrioska aos filtros em microfita,” in MOMAG2016, Porto Alegre, RS, Brasil, 25–29 de julho, 2016, pp. 1-5.
- [11] Alfrêdo Gomes Neto, Amaro Flor Neto, Mylenna Correia de Andrade, Jefferson Costa e Silva, Joabson Nogueira de Carvalho, “Filtros em microfita utilizando a geometria anéis matrioska circulares,” in MOMAG2018, Santa Rita do Sapucaí, MG, , Brasil, 12–15 de agosto, 2018, pp. 1. p.366 - 370.

- [12] A. Gomes Neto, A. Gonçalves da Costa and C. da Silva Moreira, T. R. de Sousa, I. B. G. Coutinho “A new planar sensor based on the matryoshka microstrip resonator,” *Proc. SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. (IMOC)*, Aguas de Lindoia, Brazil, Aug. 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/IMOC.2017.8121074.
- [13] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, A. J. R. Serres, M. de O. Alencar¹, I. B. G. Coutinho, and T. da S. Evangelista, “Dual-band band-pass frequency selective surface based on the matryoshka geometry with angular stability and polarization independence,” *Proc. 14th Eur. Conf. Antennas Propagat. (EuCAP)*, Copenhagen, Denmark, Mar. 2020, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135542.
- [14] Ansys Eletromagnetics Suite 19.1. Disponível em: <<http://www.ansys.com>>. Acesso em 20/06/2022.
- [15] D. Formiga Mamedes, A. Gomes Neto, J. Bornemann, J. C. e Silva, F. A. T. Abreu, “A Sensor Using a Matryoshka Geometry Defected Gound Structure,” *Published in : 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Madrid, Spain, Mar. 2022, doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9768950. – Usar a referência que é citada no artigo <https://macro.lsu.edu/HowTo/solvents/Dielectric Constant .htm>
- [16] FRANCO, A. P.; YAMAMOTO, L. Y.; TADINI, C. C.; GUT, J. A. W. Dielectric properties of green coconut water relevant to microwave processing: Effect of temperature and field frequency. *Journal of Food Engineering* 155, 69-78, 2015.
- [17] Rossi, Arley Silva, **Cinética de aquecimento e secagem, propriedades dielétricas e simulação computacional aplicado ao tratamento de cascalho de perfuração por microondas** , Tese de Doutorado, UFU, Uberlandia, MG, Brasil, 2017.