



Danila Araújo Santos

FILTROS DGSs BASEADOS NA GEOMETRIA MATRIOSKA

Orientador: Alfrêdo Gomes Neto, Dr.

Coorientador: Jefferson Costa e Silva, Dr.

João Pessoa - PB
2023

Danila Araújo Santos

FILTROS DGSs BASEADOS NA GEOMETRIA MATRIOSKA

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. Alfrêdo Gomes Neto
Coorientador: Prof. Dr. Jefferson Costa e Silva

João Pessoa – PB
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

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

S237f

Santos, Danila Araújo.

Filtros DGSs baseados na geometria matrioska / Danila Araújo Santos. – 2023.

53 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 Alfrêdo Gomes Neto.

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

1. Filtros planares. 2. DGS. 3. Matrioska. 4. Miniaturização 5. Seletividade. I. Título.

CDU 621.372.852.1(043)

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

FILTROS DGSs BASEADOS NA GEOMETRIA MATRIOSKA

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 25 de maio de 2023.

Membros da Banca Examinadora:

Dr. Alfredo Gomes Neto

IFPB – PPGEE

Dr. Jefferson Costa e Silva

IFPB – PPGEE

Dr. Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos

UFRN – PPGEEC

Dr. Adaildo Gomes D Assunção Junior

IFPB - PPGEE

Dr. Paulo Henrique da Fonseca Silva

IFPB – PPGEE

Documento assinado eletronicamente por:

- Alfredo Gomes Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 25/05/2023 12:09:04.
- Jefferson Costa e Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 25/05/2023 12:35:13.
- Adaildo Gomes D Assuncao Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/05/2023 08:28:48.
- Paulo Henrique da Fonseca Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 29/05/2023 07:29:44.
- Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos, PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL, em 30/06/2023 17:37:27.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 27/04/2023. 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 421001
Verificador: 4b0821df45
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, que me deu forças para superar todos os obstáculos. À minha família e amigos, por serem fonte de luz e esperança na minha vida.

AGRADECIMENTOS

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

Aos familiares e amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

Aos professores Alfredo e Jefferson, por terem sido meus orientadores e por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

Ao GTEMA, pela disponibilização de materiais e equipamentos que foram de grande utilidade para a elaboração deste trabalho científico.

EPÍGRAFE

“Deixe o futuro dizer a verdade, e avaliar cada um de acordo com seus trabalhos e suas conquistas.”

Nikola Tesla

RESUMO

Nesta pesquisa é investigado o desenvolvimento de filtros planares utilizando estruturas com modificação no plano terra, DGS, baseados na geometria matrioska, caracterizados pela miniaturização (redução da frequência de ressonância) e seletividade (filtros DGS-matrioska). Foram fabricados e caracterizados quatorze filtros DGS-matrioska, considerando diferentes dimensões, número de anéis, anéis fechados e anéis abertos, assimilando as características da geometria matrioska, incluindo as equações iniciais de projeto, seus princípios básicos e aplicações. A aplicabilidade das equações iniciais de projeto e confirmação das características da geometria matrioska foram observados e os resultados numéricos e experimentais para os filtros DGS-matrioska, apresentaram uma boa concordância, confirmando as características esperadas.

Palavras-chave: Filtros planares, DGS, matrioska, miniaturização, seletividade, anel aberto.

ABSTRACT

In this research, the development of planar filters using structures with modification in the ground plane, DGS, based on matrioska geometry, characterized by miniaturization (reduction of the resonant frequency) and selectivity (DGS- matrioska filters) is investigated. Fourteen DGS- matrioska filters were manufactured and characterized, considering different dimensions, number of rings, closed rings and open rings, assimilating the characteristics of matrioska geometry, including the initial design equations, your Principles basic It is applications. The applicability of the initial design equations and confirmation of the characteristics of the matrioska geometry were observed and the numerical and experimental results for the DGS- matrioska filters, showed good agreement, confirming the expected characteristics.

Keywords: Planar filters, DGS, matrioska, miniaturization, selectivity, open ring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Integração de mídias que convergem para interagir em um único ambiente.	16
Figura 2 – Exemplo de esquema onde é necessário suprimir um sinal interferente.	17
Figura 3 – Exemplos de filtros baseados na geometria matrioska.	18
Figura 4 – Exemplo de estrutura DGS- geometria haltere.	18
Figura 5 – Formatos DGS.	19
Figura 6 – Exemplo de filtro usando estrutura DGS baseado na geometria matrioska.	19
Figura 7 – Geometria matrioska passo a passo.	22
Figura 8 – Geometria matrioska com dois anéis concêntricos, um anel matrioska.	22
Figura 9 – Geometria matrioska com três anéis concêntricos, dois anéis matrioska.	22
Figura 10 – Geometria matrioska aberta.	23
Figura 11 – Linha de microfita com estrutura DGS em forma de haltere.	23
Figura 12 – Resposta em frequência típica de um ressonador com dois ou mais anéis matrioska.	25
Figura 13 – Dimensões do filtro DGS baseado na geometria matrioska.	27
Figura 14 – Dimensões do filtro DGS baseado na geometria haltere.	27
Figura 15 – $ S (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, DGSM1, $w_{ma1} = 20,0 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 14,0 \text{ mm}$.	28
Figura 16 – $ S (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, DGSM2, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 11,0 \text{ mm}$.	29
Figura 17 – $ S (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, DGSM3, $w_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 9,5 \text{ mm}$.	29
Figura 18 – $ S (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, DGSM4, $w_{ma1} = 14,0 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 8,0 \text{ mm}$.	29
Figura 19 – $ S (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, DGSM5, $w_{ma1} = 12,5 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 6,5 \text{ mm}$.	30
Figura 20 – $ S_{21} (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, DGSH1 haltere 20,0 mm.	30
Figura 21 – $ S_{21} (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, DGSH2 haltere 17,0 mm.	31
Figura 22 – $ S_{21} (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, DGSH3 haltere 15,5 mm.	31
Figura 23 – $ S_{21} (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, DGSH4 haltere 14,0 mm.	31
Figura 24 – $ S_{21} (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, DGSH5 haltere 12,5 mm.	32
Figura 25 – Configuração de medição.	33
Figura 26 – $ S (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, 3D-02, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$.	34
Figura 27 – $ S (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, 3D-02A, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$, aberto.	35
Figura 28 – $ S (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, 3D-03, $w_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$.	36
Figura 29 – $ S (dB) \times \text{Freq.}(GHz)$, 3D-03A, $w_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$, aberto.	37

Figura 30 – $ S (dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-03B, $w_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0 \text{ mm}$.	38
Figura 31 – $ S (dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-03C, $w_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 2,0 \text{ mm}$, aberto.	39
Figura 32 – $ S (dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-04, $w_{ma1} = 14,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$.	40
Figura 33 – $ S (dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-04A, $w_{ma1} = 14,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$, aberto.	41
Figura 34 – $ S (dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-05, $w_{ma1} = 12,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$.	42
Figura 35 – $ S (dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-05A, $w_{ma1} = 12,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$, aberto.	43
Figura 36 – $ S (dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-06, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0 \text{ mm}$.	45
Figura 37 – $ S (dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-06A, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0 \text{ mm}$.	46
Figura 38 – $ S (dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-06B, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0 \text{ mm}$.	47
Figura 39 – $ S (dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-06C, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0 \text{ mm}$, aberto.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões das DGS matrioska.	27
Tabela 2 – Dimensões das DGS haltere.	28
Tabela 3 – Resumo das frequências de ressonância para os filtros DGS - geometrias matrioska e haltere.	32
Tabela 4 – Largura da banda de rejeição para filtros DGS - geometrias matrioska e haltere.	32
Tabela 5 – Resultados para o filtro 3D-02.	34
Tabela 6 – Resultados para o filtro 3D-02A.	35
Tabela 7 – Resultados para o filtro 3D-03.	36
Tabela 8 – Resultados para o filtro 3D-03A.	37
Tabela 9 – Resultados para o filtro 3D-03B.	38
Tabela 10 – Resultados para o filtro 3D-03C.	39
Tabela 11 – Resultados para o filtro 3D-04.	40
Tabela 12 – Resultados para o filtro 3D-04A.	41
Tabela 13 – Resultados para o filtro 3D-05.	42
Tabela 14 – Resultados para o filtro 3D-05A.	43
Tabela 14 – Resultados para o filtro 3D-06.	45
Tabela 14 – Resultados para o filtro 3D-06A.	46
Tabela 14 – Resultados para o filtro 3D-06B.	47
Tabela 14 – Resultados para o filtro 3D-06C.	48

LISTA DE SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
IP	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet
IoT	<i>Internet of Things</i> , Internet das Coisas
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
DGS	<i>Defected Ground Structure</i> , Estrutura com Defeito no Plano Terra
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i> , Superfície Seletiva em Frequência
PBG	<i>Photonic Band Gap</i>
EBG	<i>Eletromagnetic Band Gap</i>
AL	Atenuação Livre
BRW	<i>Band Rejection Width</i> , Largura da Banda de Rejeição

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{res}	Frequência de ressonância
L_{eff}	Comprimento efetivo
ϵ_{reff}	Permissividade elétrica relativa efetiva
w_{ma}	Largura das fitas dos anéis
w_{ma1}	Dimensão do primeiro anel matrioska
w_{ma2}	Dimensão do segundo anel matrioska
w_{ma3}	Dimensão do terceiro anel matrioska
g	<i>gap</i> , fenda
$fc1$	Primeira frequência de corte
$fc2$	Segunda frequência de corte
$fr1$	Primeira frequência de ressonância
$fr2$	Segunda frequência de ressonância
$f_{rmédia}$	Frequência de ressonância central
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
w	Largura da microfita
L	Distância entre as portas 1 e 2
$ S_{11} $	Coefficiente de reflexão
$ S_{21} $	Coefficiente de transmissão
h	Espessura do substrato

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos	19
1.1.1 Objetivo geral	19
1.1.2 Objetivos específicos	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Geometria matrioska	21
2.2 Estruturas DGSs	23
2.3 Parâmetros de análise dos filtros	24
3 RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS	26
3.1 Comparação dos filtros DGSs baseados nas geometrias matrioska e haltere	26
3.2 Filtros DGSs baseados na geometria matrioska – resultados numéricos e experimentais	32
3.2.1 Filtros DGSs baseados na geometria matrioska – dois anéis	33
3.2.2 Filtros DGSs baseados na geometria matrioska – três anéis	44
4 CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

A influência da tecnologia no comportamento humano desde o seu surgimento é de grande importância e na atualidade está tão presente no dia a dia que as vezes não observamos. A facilidade de ter acesso a essas tecnologias trouxeram mudanças significativas pois, antes a comunicação era basicamente confinada às pessoas próximas e devido ao desenvolvimento dos sistemas de telecomunicações tornou-se possível estabelecer comunicação à distância. Mais recentemente, em decorrência da mobilidade dos atuais sistemas de telecomunicações sem fio, a comunicação passou a ser de maneira quase que contínua e em tempo real, incluindo comunicações entre pessoas e dispositivos (ou coisas), entre máquinas etc. Por isso a busca constante de aprimorar os meios de comunicação [1], [2].

A tecnologia das telecomunicações assumiu um papel fundamental, sendo impulsionada a partir de tendências como a grande utilização da Internet por parte da população [3], ficando impossível imaginar a execução de determinadas atividades sem a utilização de alguma faixa do espectro de frequências. Essas atividades (por exemplo: escutar o rádio, assistir a um programa de TV, fazer uma ligação do celular, usar um aplicativo do banco, ligar e desligar o carro à distância etc.) ao ser compartilhado por vários usuários com tecnologias semelhantes podem levar à degradação indesejável dos sistemas de telecomunicações [4]-[7]. Portanto, o uso do espectro eletromagnético, e os respectivos serviços de telecomunicações, tem um alto valor agregado, sendo sujeito à regulamentação. No Brasil, essa regulamentação é atribuída à ANATEL [8], [9]. A integração de vários serviços convergindo em um único ambiente é apresentada como exemplo na ilustração da Figura 1.

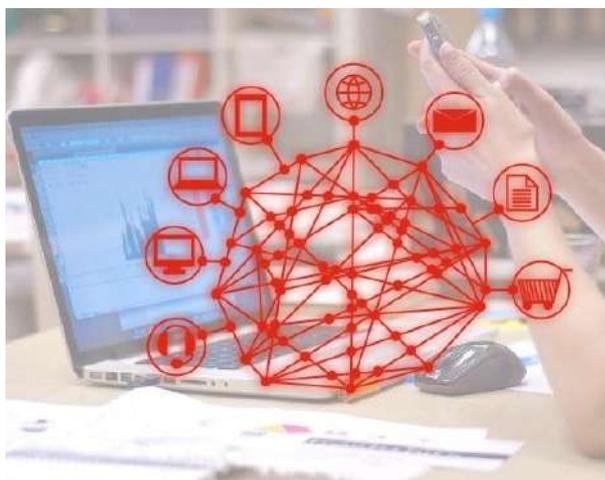


Figura 1 - Integração de mídias que convergem para interagir em um único ambiente. Fonte: De autoria própria.

O desenvolvimento de equipamentos eletrônicos também tem avançado para que cada item doméstico possua um protocolo de internet (IP) e esteja conectado à Internet. Essa convergência digital, aliada à tendência da Internet das Coisas (IoT), tende a consolidar vários produtos ou serviços de diferentes tecnologias em uma única plataforma, ou produto, por exemplo, colocar vários serviços em um aparelho celular, como câmera digital, relógio, mp3 *player*, *bluetooth*, Wi-Fi, entre outros [10]. Assim sendo, separar os sinais desejados dos não desejados, torna-se imprescindível. Esta função, separar os sinais desejados dos não desejados, é realizada pelos filtros.

Em sistemas de telecomunicações os filtros possibilitam várias aplicações, sendo amplamente utilizados para processamento de sinais, em sistema de alimentação, controles entre outras, desempenhando um papel fundamental na otimização da utilização das faixas de frequências para as quais foram projetados, podendo suprimir ou deixar passar determinados sinais, como exemplificado na Figura 2.

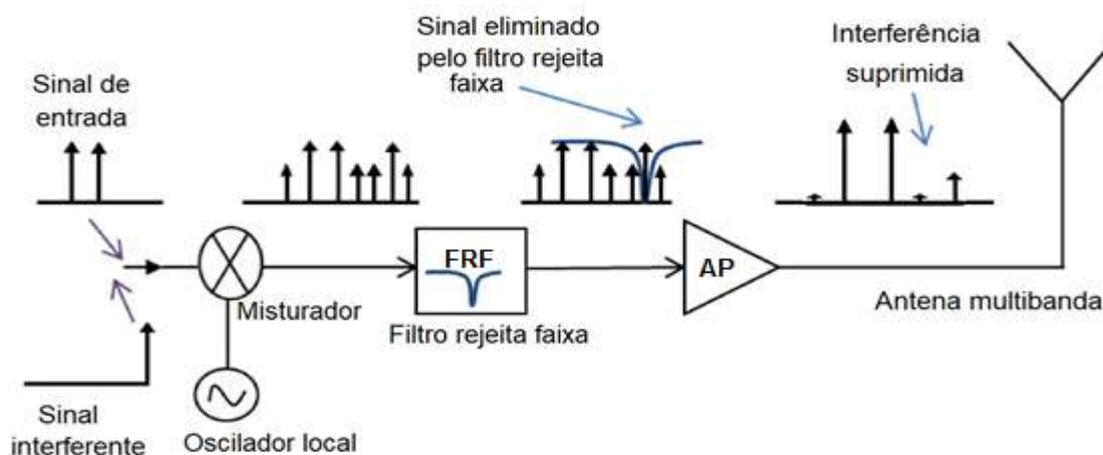
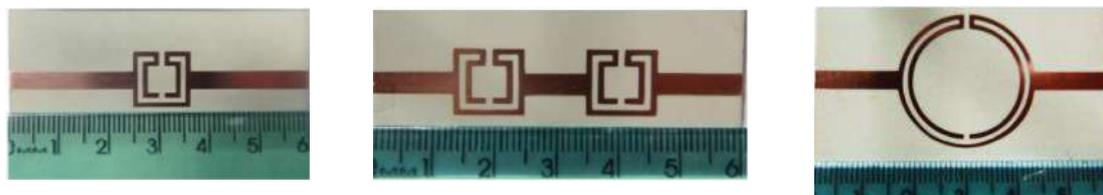


Figura 2 – Exemplo de esquema onde é necessário suprimir um sinal interferente, adaptado de [11].

Procurando atender às novas demandas dos sistemas de telecomunicações, o Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA), do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), tem desenvolvido pesquisas de dispositivos com novas formas geométricas, entre os quais, filtros planares baseados na geometria matrioska [12]-[14], (Figura 3), observando-se, além da redução da frequência de ressonância, uma rápida transição da banda passante para a banda de rejeição, *roll-off*. Assim sendo, dando continuidade a essas pesquisas, nesta dissertação de mestrado é investigado o desenvolvimento de filtros planares utilizando

estruturas com modificação no plano terra (*Defected Ground Structure*), DGS, baseados na geometria matrioska.



a) Filtro com um anel matrioska

b) Filtro com dois ressonadores em série

c) Filtro com um anel matrioska circular

Figura 3 – Exemplos de filtros baseados na geometria matrioska [12], [13].

As estruturas DGSs, são formadas a partir da remoção de uma parte do plano terra de uma linha de transmissão planar, Figura 4. Devido a essa modificação haverá uma perturbação na distribuição da corrente no plano terra, alterando as características da linha de transmissão, como capacitância e indutância da linha, modificando a sua resposta em frequência [15]. Essas modificações feitas no plano terra, quando adequadamente projetadas, podem ser utilizadas para obtenção de filtros DGSs [16], [17], divisores de potência [18], [19], antenas [20], [21], sensores [22],[23] e transferência de energia sem fio [24],[25].

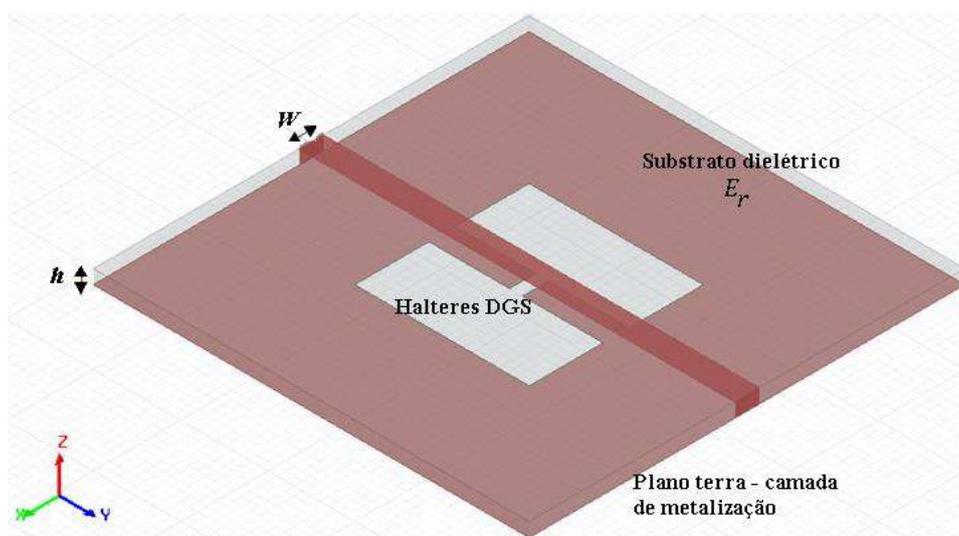


Figura 4 – Exemplo de estrutura DGS- geometria haltere - *dumbbell*. Fonte: De autoria própria.

Embora exista uma grande variedade de geometrias (halteres, seta com terminação em espiral, seta em fenda, H, anéis circulares, anéis abertos, interdigital etc.) [15], Figura 5, os atuais requisitos dos sistemas de telecomunicações (largura de banda, seletividade, baixo custo etc.) demandam o desenvolvimento de novas configurações. Portanto, justifica-se o desenvolvimento de filtros DGSs baseados na geometria matrioska, Figura 6, pois procura

atender aos requisitos dos sistemas de telecomunicações, aliando as características da geometria matrioska às estruturas DGSs.

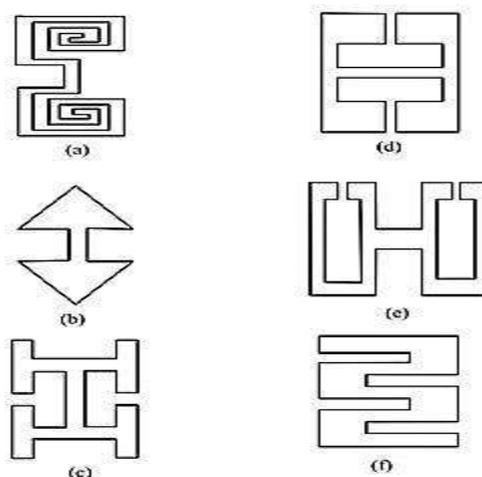


Figura 5 – Formatos DGSs – (a) Cabeça em espiral, (b) Ponta de seta, (c) Haltere de forma aberta, (d) Espira quadrada aberta com fenda intermediária, (e) Haltere de espira aberta, (f) DGS interdigital [15].

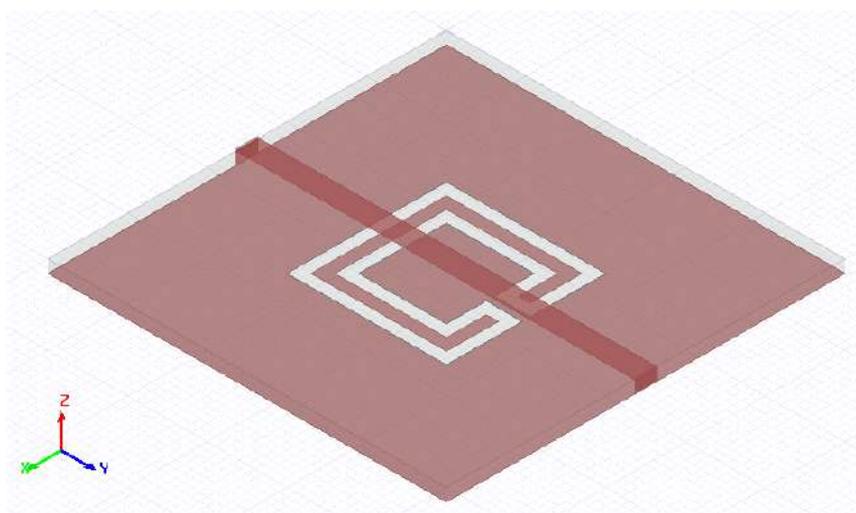


Figura 6 – Exemplo de filtro usando estrutura DGS baseado na geometria matrioska.
Fonte: De autoria própria.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo geral desenvolver filtros com estrutura DGS baseados na geometria matrioska.

1.1.2 Objetivos específicos

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

- ✓ Revisar a bibliografia relativa ao projeto e compreender os conceitos básicos dos filtros, em especial os filtros planares na faixa de micro-ondas;
- ✓ Assimilar as características da geometria matrioska, incluindo as equações iniciais de projeto;
- ✓ Compreender os princípios dos filtros DGSs, considerando os efeitos da geometria na resposta em frequência;
- ✓ Selecionar aplicações específicas para aplicação dos filtros com estrutura DGS baseados na geometria matrioska;
- ✓ Projetar e caracterizar filtros com estrutura DGS propostos para as aplicações selecionadas;
- ✓ Avaliar a aplicabilidade das equações iniciais de projeto;
- ✓ Fabricar e caracterizar experimentalmente os filtros projetados e comparar os resultados obtidos com os resultados numéricos;
- ✓ 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 filtros serão avaliados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA), do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), tem sido realizadas pesquisas utilizando da geometria matrioska em filtros planares. Filtros utilizando ressonadores baseados na geometria matrioska foram apresentados em [12],[13],[14]. Portanto, o desenvolvimento de filtros DGSs baseadas na geometria matrioska é uma evolução natural das pesquisas realizadas.

2.1 Geometria matrioska

Para se obter um anel com a geometria matrioska, inicialmente dois anéis concêntricos são projetados, Figura 7(a). Então, uma fenda é inserida na mesma posição dos dois anéis, Figura 7(b). Finalmente, os anéis concêntricos são interligados e o anel matrioska obtido, Figura 7(c). Destaque-se que, de maneira semelhante às superfícies seletivas em frequência (*Frequency Selective Surfaces*), FSS, do tipo passa-faixa [26], [27], a geometria matrioska é removida da camada de metalização do plano terra. Na Figura 8 são mostradas as dimensões consideradas para o anel matrioska.

Usualmente, $w_{xma1} = w_{yma1} = w_{ma1}$ e $w_{xma2} = w_{yma2} = w_{ma2}$. Como uma primeira aproximação, a frequência de ressonância pode ser calculada por:

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

sendo,

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

e,

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

ϵ_{reff} é a permissividade elétrica relativa para a linha de microfita, podendo ser facilmente calculada utilizando programas computacionais, como por exemplo, o disponível em [28]. Destaque-se aqui que as equações (1)-(3) são equações iniciais de projeto, um primeiro passo para, quando necessário, uma posterior otimização numérica.



Figura 7 – Geometria matrioska passo a passo [29].

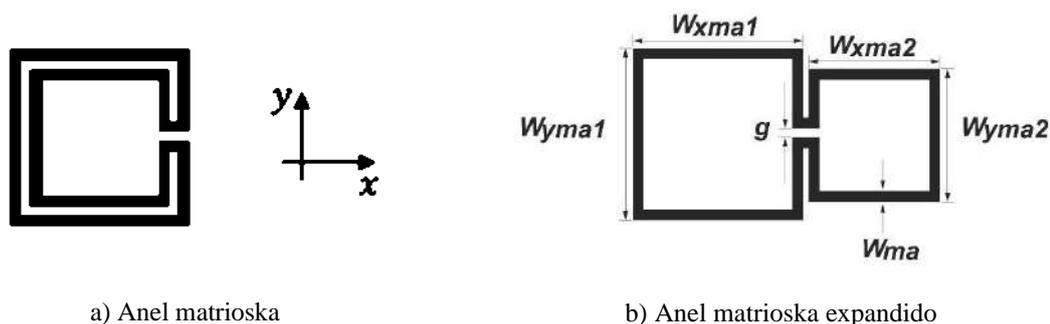


Figura 8 – Geometria matrioska com dois anéis concêntricos, um anel matrioska [29].

Caso deseje-se mais um anel matrioska, o processo se repete, inserindo-se um novo anel concêntrico, Figura 9.

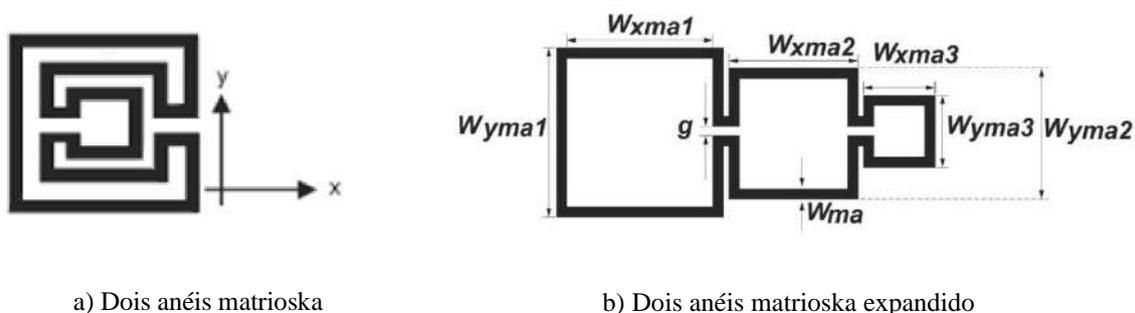


Figura 9 – Geometria matrioska com três anéis concêntricos, dois anéis matrioska [14].

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

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

Dependendo da técnica de fabricação e da necessidade de miniaturização, uma maior quantidade de anéis pode ser inserida, inclusive variando os valores da largura das fitas, w_{ma} , ou do gap, g .

Se for utilizado um anel matrioska aberto, Figura 10, a frequência de ressonância cai para aproximadamente a metade do valor do anel matrioska.

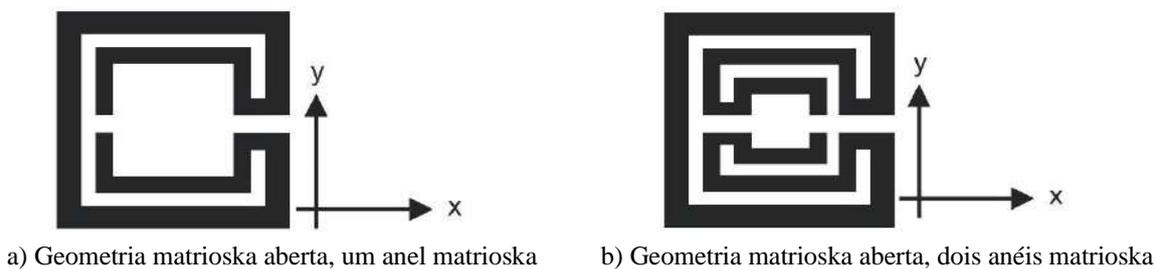


Figura 10 – Geometria matrioska aberta [12].

2.2 Estruturas DGSs

As estruturas com defeito no plano terra, conhecidas por DGS (do inglês *Defected Ground Structure*), inicialmente são formadas pela remoção de certa geometria do plano terra de linhas de transmissão planares, podendo essa geometria removida apresentar arranjos de formas periódicas ou não. A DGS é uma técnica utilizada para melhorar vários parâmetros na tecnologia de micro-ondas, sendo os efeitos das modificações na estrutura semelhantes aos obtidos com o uso de estruturas PBG (do inglês, *Photonic Band Gap*) [30].

Um dos primeiros trabalhos sobre estruturas DGSs, foi publicado por Jong-Im Park et al., com DGS com forma de haltere retangular, [31], como ilustrado na Figura. 11.

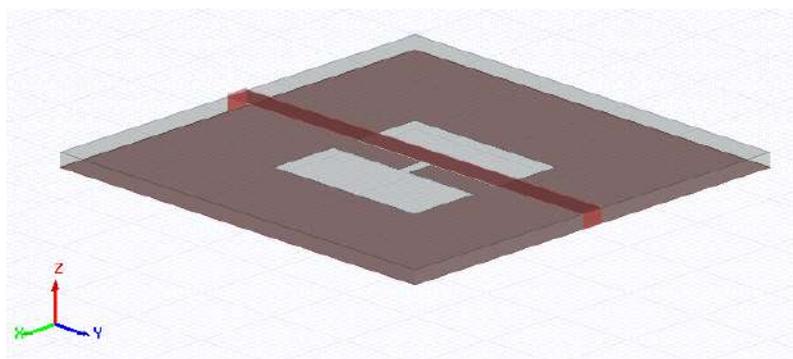


Figura 11 – Linha de microfita com estrutura DGS em forma de haltere retangular.
Fonte: De autoria própria.

As principais vantagens das estruturas DGSs em comparação ao PBG são as seguintes [32]:

- A área do circuito torna-se relativamente pequena sem estruturas periódicas porque apenas alguns elementos DGSs têm as propriedades típicas semelhantes à estrutura periódica, como a característica rejeita faixa.
- Os parâmetros S simulados para a unidade DGS de haltere podem ser combinados com a resposta passa-baixa do tipo Butterworth.
- Quando comparadas às estruturas PBG, as estruturas DGSs ocupam uma área menor do circuito, apresentando o efeito de onda lenta (aumento da capacitância e da indutância efetivas), para apenas uma, ou poucas, unidades.
- Comparado com o PBG, a DGS é mais fácil de ser projetado e implementado e tem maior precisão com estruturas de defeitos regulares.

A DGS causa modificações na impedância de entrada e no fluxo de corrente, podendo, em certas condições, apresentar uma faixa de frequência na qual não exista propagação de ondas eletromagnéticas, ou seja, como uma aplicação em EBG (do inglês, *Eletromagnetic Band Gap*), podendo melhorar a eficiência de circuitos planares e antenas. Em outras palavras, qualquer modificação gravada no defeito do plano terra sob a linha de microfita altera a capacitância e a indutância efetivas.

2.3 Parâmetros de análise dos filtros

Uma informação importante é como os filtros são analisados nesta dissertação. Embora sejam usados parâmetros convencionais, na Figura 12 é descrito o conjunto de parâmetros que é adotado. Parte desses parâmetros são utilizados na análise dos filtros desta dissertação.

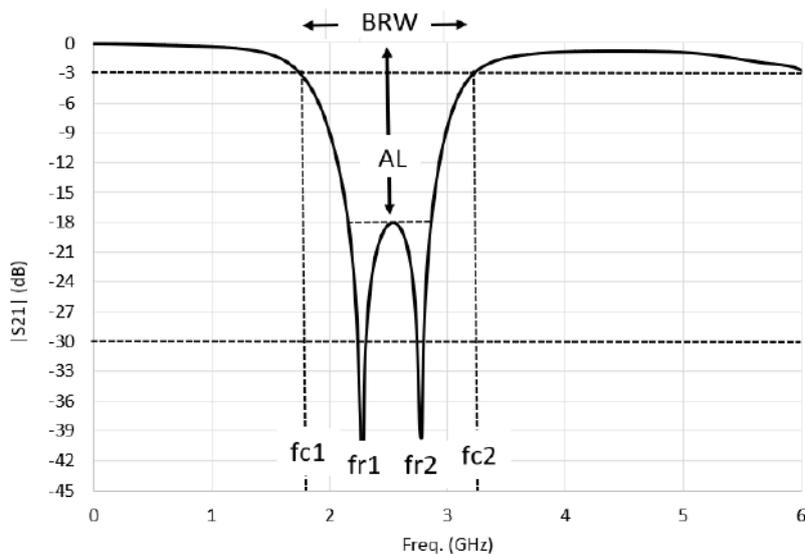


Figura 12 - Resposta em frequência típica de um ressonador com dois ou mais anéis matrioska [12].

- Frequências de corte em -3 dB, $fc1$ e $fc2$;
- Frequências de ressonância, $fr1$ e $fr2$;
- Frequência central da região de ressonância, $f_{média} = \frac{fr1+fr2}{2}$
- Largura da banda de rejeição definida em -3 dB, BRW ; Obs: nos resultados apresentados será considerada a largura de banda de rejeição definida em -10 dB.
- Atenuação livre, AL ;
- Região de transição de -3 dB a -30 dB.

3 RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

É essencial a utilização da simulação computacional na fase de desenvolvimento dos filtros para prever possíveis resultados e ajudar a assimilar as características das DGSs baseadas na geometria matrioska, verificando se as equações iniciais de projeto são eficientes se confrontados com os resultados numéricos. Desse modo, é possível examinar as variáveis da geometria de um protótipo digital antes da fabricação do dispositivo. Nesta dissertação, as simulações dos filtros foram realizadas utilizando o software Ansys Elemtromagnetics Suite 19.1[33].

Em uma primeira etapa dos resultados, cinco filtros DGSs baseados na geometria matrioska, com apenas um anel matrioska, foram caracterizados numericamente e comparados com filtros baseados na geometria haltere.

Em seguida, foram selecionados dez filtros DGSs baseados na geometria matrioska, sendo esses filtros fabricados e caracterizados numericamente e experimentalmente. Nesta etapa foram considerados filtros com dois e três anéis concêntricos, um e dois anéis matrioska, respectivamente, com geometria fechada e aberta.

Em todos os casos o substrato considerado é o FR-4, de espessura $1,6\text{ mm}$, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $0,02$, com largura de microfita $w = 2,8\text{ mm}$.

3.1 Comparação dos filtros DGSs baseados nas geometrias matrioska e haltere

Inicialmente foram caracterizados numericamente cinco filtros DGSs baseados na geometria matrioska, Figura 13. Para todos os filtros DGSs a distância entre as portas 1 e 2, L , é de 50 mm , sendo as demais dimensões apresentadas na Tabela I. Nesta seção, foi adotada a nomenclatura DGSM para indicar que o filtro DGS é baseado na geometria matrioska.

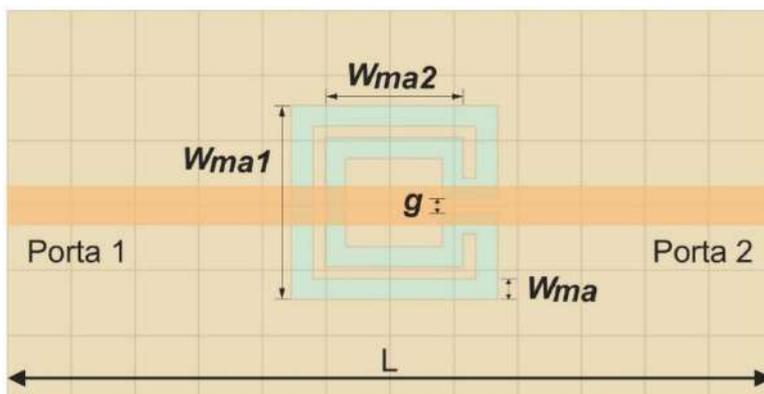


Figura 13 – Dimensões do filtro DGS baseado na geometria matrioska.

Tabela I – Dimensões das DGSs matrioska

	w_{ma1}	w_{ma2}	w_{ma}	g
DGSM1	20,0 mm	14,0 mm	1,5 mm	1,0 mm
DGSM2	17,0 mm	11,0 mm	1,5 mm	1,0 mm
DGSM3	15,5 mm	9,5 mm	1,5 mm	1,0 mm
DGSM4	14,0 mm	8,0 mm	1,5 mm	1,0 mm
DGSM5	12,5 mm	6,5 mm	1,5 mm	1,0 mm

As dimensões dos filtros DGSs baseados na geometria haltere são ilustradas na Figura 14 e os seus valores apresentados na Tabela II. Note que os filtros DGSs baseados na geometria haltere ocupam praticamente a mesma área dos seus respectivos com geometria matrioska. Nesta seção, foi adotada a nomenclatura DGS_H para indicar que o filtro DGS é baseado na geometria haltere.

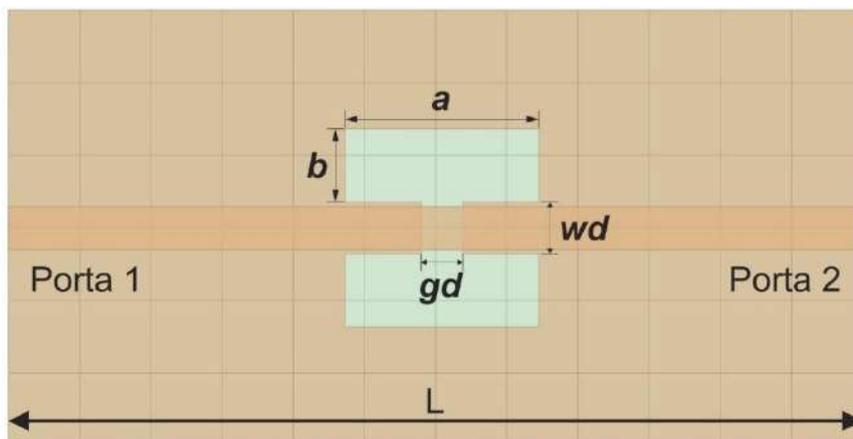


Figura 14 – Dimensões do filtro DGS baseado na geometria haltere.

Tabela II – Dimensões das DGSs haltere

	a	b	gd	wd
DGSH1	20,0 mm	8,5 mm	1,5 mm	3,0 mm
DGSH2	17,0 mm	7,0 mm	1,5 mm	3,0 mm
DGSH3	15,5 mm	6,25 mm	1,5 mm	3,0 mm
DGSH4	14,0 mm	5,5 mm	1,5 mm	3,0 mm
DGSH5	12,5 mm	4,75 mm	1,5 mm	3,0 mm

As Figuras 15-19 apresentam as respostas em frequência para os filtros DGSs baseados na geometria matrioska, verificando-se as seguintes frequências de ressonância: 1,53 GHz, 1,90 GHz, 2,15 GHz, 2,65 GHz e 3,30 GHz, DGSM1, DGSM2, DGSM3, DGSM4 e DGSM5, respectivamente. Esses resultados apresentaram uma boa concordância com os obtidos a partir das equações iniciais de projeto (1,53 GHz, 1,90 GHz, 2,16 GHz, 2,51 GHz e 3,00 GHz), indicando que essas equações são adequadas para determinar as dimensões iniciais dos filtros DGSs baseados na geometria matrioska. Os resultados obtidos para as frequências de ressonância estão resumidos na Tabela III.

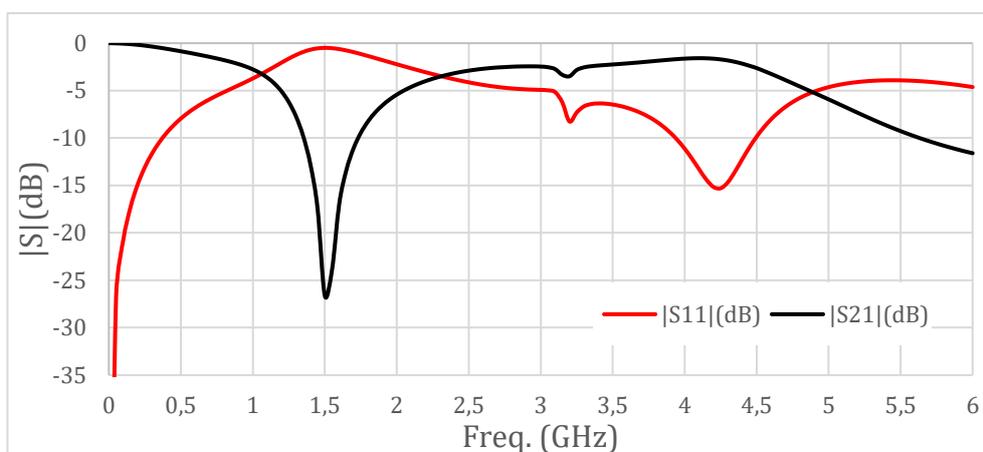


Figura 15 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, DGSM1, $w_{ma1} = 20,0 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 14,0 \text{ mm}$.

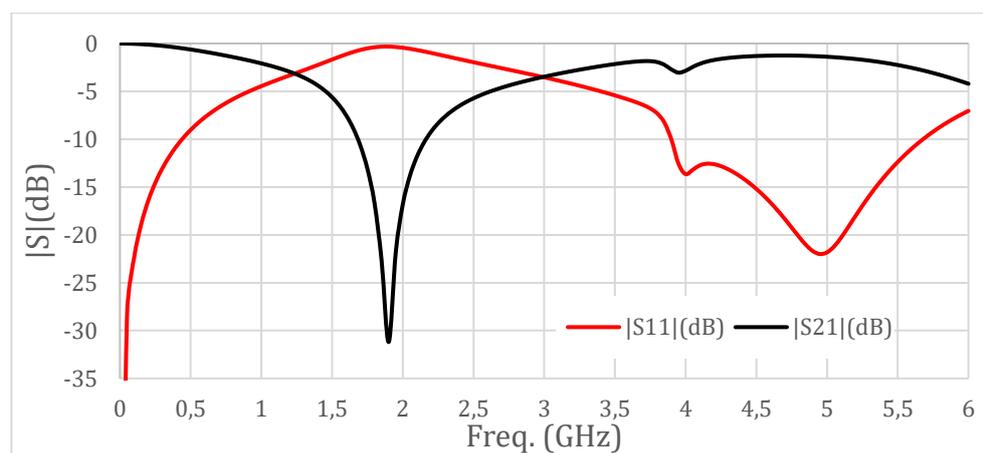


Figura 16 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, DGSM2, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 11,0 \text{ mm}$.

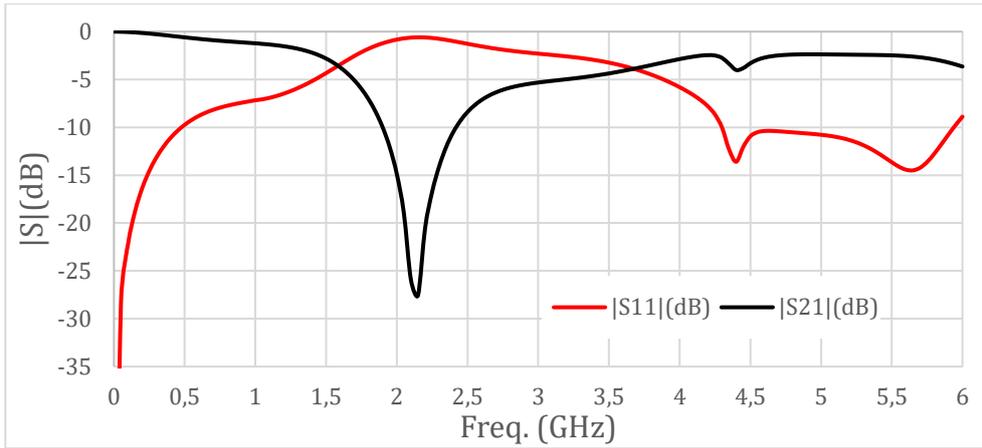


Figura 17 – $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, DGSM3, $w_{ma1} = 15.5 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 9.5 \text{ mm}$.

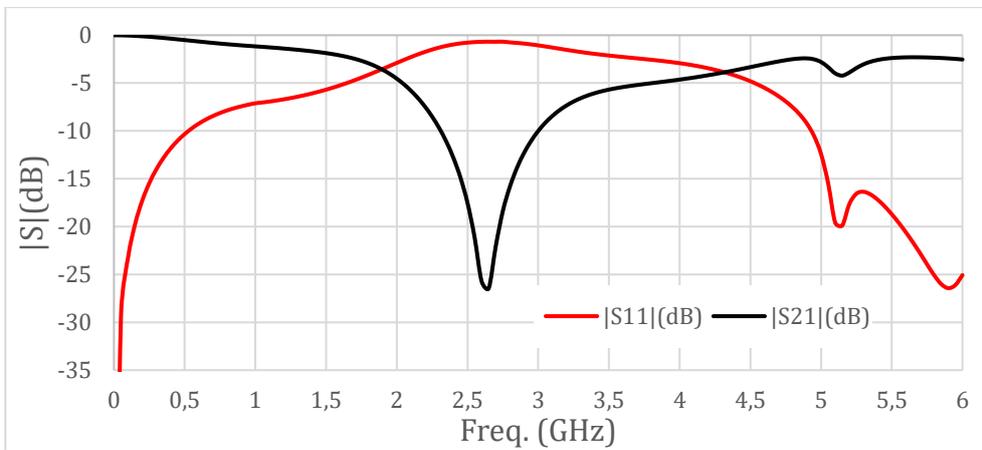


Figura 18 – $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, DGSM4, $w_{ma1} = 14.0 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 8.0 \text{ mm}$.

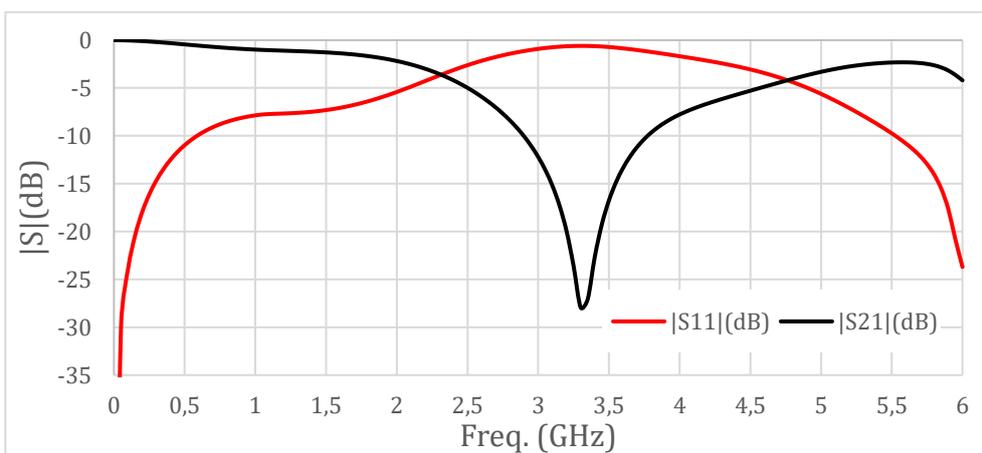


Figura 19 – $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, DGSM5, $w_{ma1} = 12.5 \text{ mm}$, $w_{ma2} = 6.5 \text{ mm}$.

Os resultados obtidos para os filtros DGSs baseados na geometria haltere são apresentados nas Figuras 20-24, sendo os resultados obtidos para as frequências de ressonância resumidos na Tabela III.

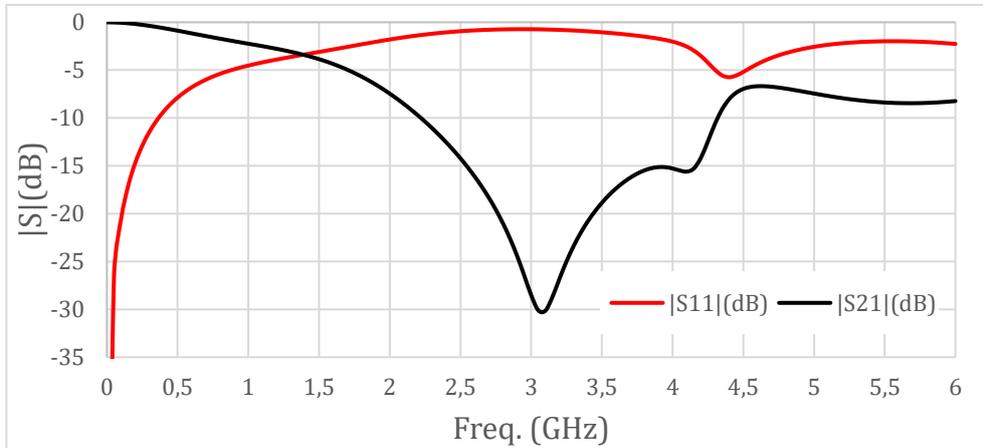


Figura 20 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, DGS1, haltere 20mm.

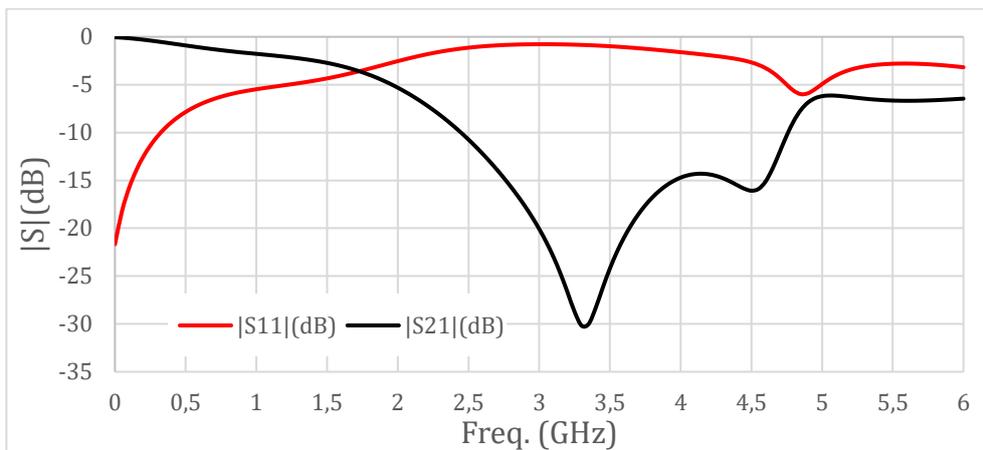


Figura 21 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, DGS2, haltere 17mm.

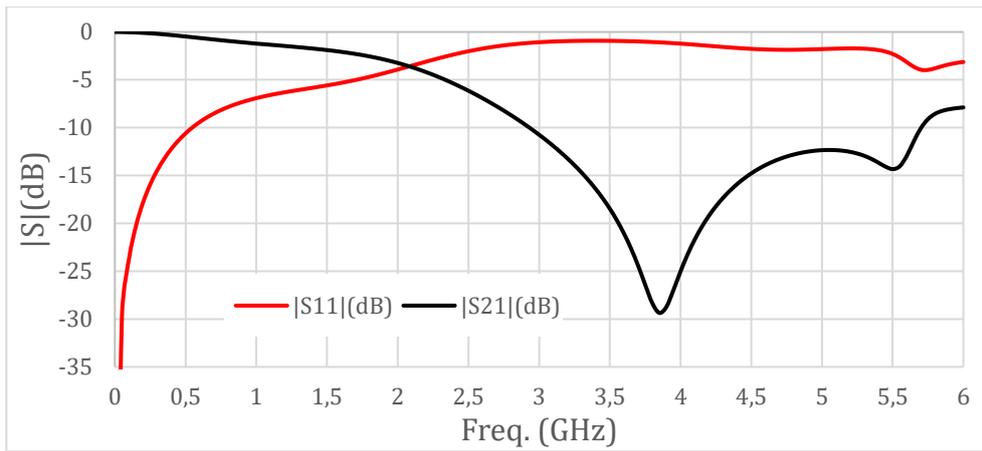


Figura 22 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, DGS3 haltere 15,5 mm.

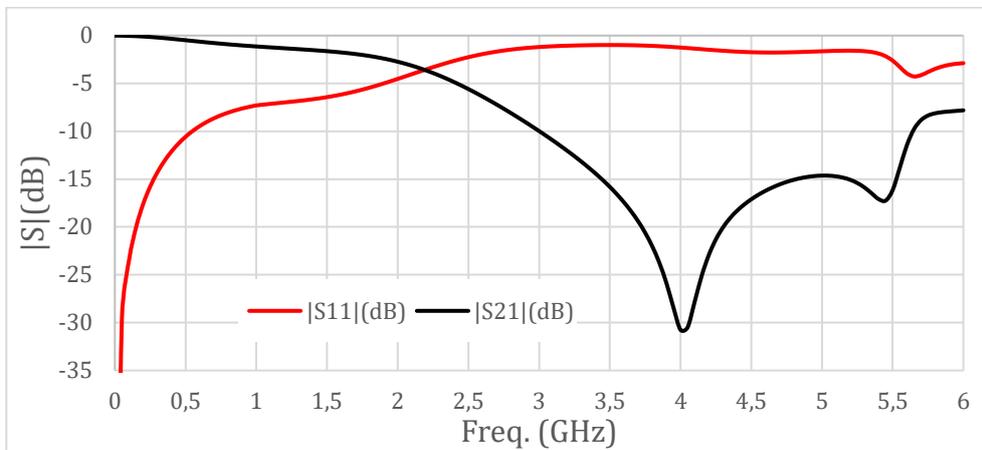
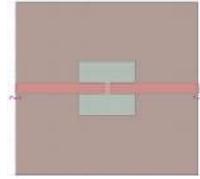


Figura 23 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, DGS4 haltere 14 mm.

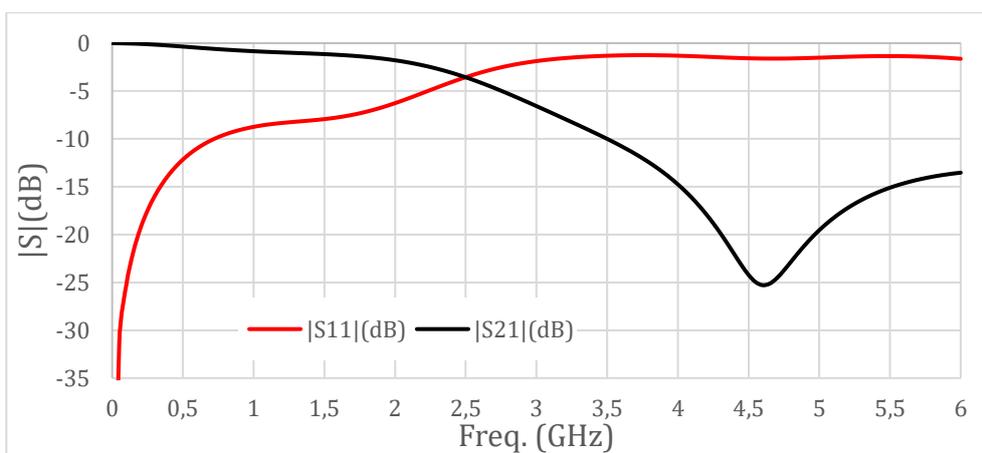
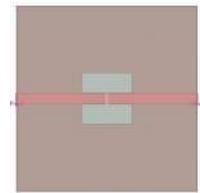


Figura 24 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, DGS5 haltere 12,5 mm.

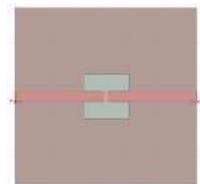


Tabela III – Resumo das frequências de ressonância para os filtros DGSs - geometrias matrioska e haltere

	<i>freq.res. (cal.)</i> (GHz)	<i>freq.res. (num.)</i> (GHz)		<i>freq.res. (num.)</i> (GHz)	$\left(\frac{freq_{res_DGSM}}{freq_{res_DGSH}}\right)\%$
DGSM1	1,53	1,53	DGSH1	3,05	50,16
DGSM2	1,90	1,90	DGSH2	3,55	53,52
DGSM3	2,15	2,16	DGSH3	3,80	56,84
DGSM4	2,65	2,51	DGSH4	4,05	61,97
DGSM5	3,30	3,00	DGSH5	4,55	65,93

Comparando os resultados resumidos na Tabela III, observa-se que os filtros DGSs baseados na geometria matrioska apresentaram uma frequência de ressonância até 50,16% menor, quando comparada a frequência de ressonância dos filtros DGSs baseados na geometria matrioska haltere, confirmando a característica de miniaturização da geometria matrioska.

Para avaliar a seletividade dos filtros DGSs, foram determinadas e comparadas as larguras da banda de rejeição considerando as geometrias matrioska e haltere. Esses resultados são apresentados na Tabela IV. Observa-se que foi considerado um limiar de -10 dB no cálculo da largura de banda de rejeição.

Tabela IV – Largura da banda de rejeição para filtros DGSs - geometrias matrioska e haltere

	BRW em -10 dB		BRW em - 10 dB	$\left(\frac{BRW_DGSM}{BRW_DGSH}\right)\%$
DGSM1	0,40 GHz	DGSH1	2,10 GHz	19,04
DGSM2	0,45 GHz	DGSH2	2,50 GHz	18,00
DGSM3	0,50 GHz	DGSH3	2,65 GHz	18,86
DGSM4	0,70 GHz	DGSH4	2,70 GHz	25,92
DGSM5	0,90 GHz	DGSH5	3,10 GHz	29,03

Observa-se que a largura de banda dos DGSs matrioska são muito mais estreitas em comparação com os DGSs haltere, ou seja, demonstrando maior seletividade.

3.2 Filtros DGSs baseados na geometria matrioska – resultados numéricos e experimentais

Os resultados medidos em laboratório são indispensáveis para esta dissertação, pois consolidam os resultados previstos numericamente e, por consequência, validam o funcionamento dos filtros DGSs baseados na geometria matrioska. Neste contexto, foram

fabricados e caracterizados quatorze filtros DGSs baseados na geometria matrioska, considerando diferentes dimensões, número de anéis, anéis fechados e anéis abertos. As medições foram realizadas no Laboratório de Medidas em Micro-ondas, do IFPB, Campus João, utilizando um analisador de redes vetorial Agilent E5071C, de acordo com a configuração apresentada na Figura 25.

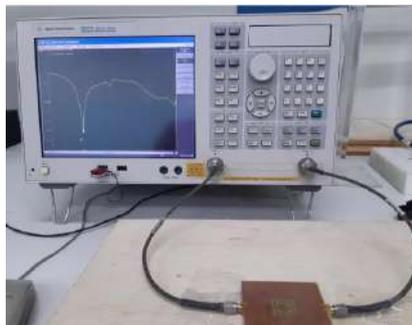


Figura 25 – Configuração de medição.

Para cada filtro DGS, foram medidos o $|S_{11}|(dB)$ (coeficiente de reflexão) e o $|S_{21}|(dB)$, sendo os resultados experimentais comparados com os resultados numéricos, obtidos usando o ANSYS HFSS. Como previamente informado, em todos os casos o substrato considerado é o FR-4, de espessura $1,6\text{ mm}$, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $0,02$, com largura de microfita $w = 2,8\text{ mm}$. A distância entre as portas 1 e 2, L , é de 60 mm , sendo as demais dimensões apresentadas nas respectivas Tabelas.

3.2.1 Filtros DGSs baseados na geometria matrioska – dois anéis

A resposta em frequência $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$ do filtro 3D-02, um filtro DGS com geometria matrioska com dois anéis retangulares concêntricos é apresentada na Figura 26. Os resultados experimentais apresentaram uma excelente concordância com os resultados numéricos, principalmente considerando o valor do S_{21} . A frequência de ressonância medida em $1,977\text{ GHz}$, possui valor igual ao numérico $1,977\text{ GHz}$.

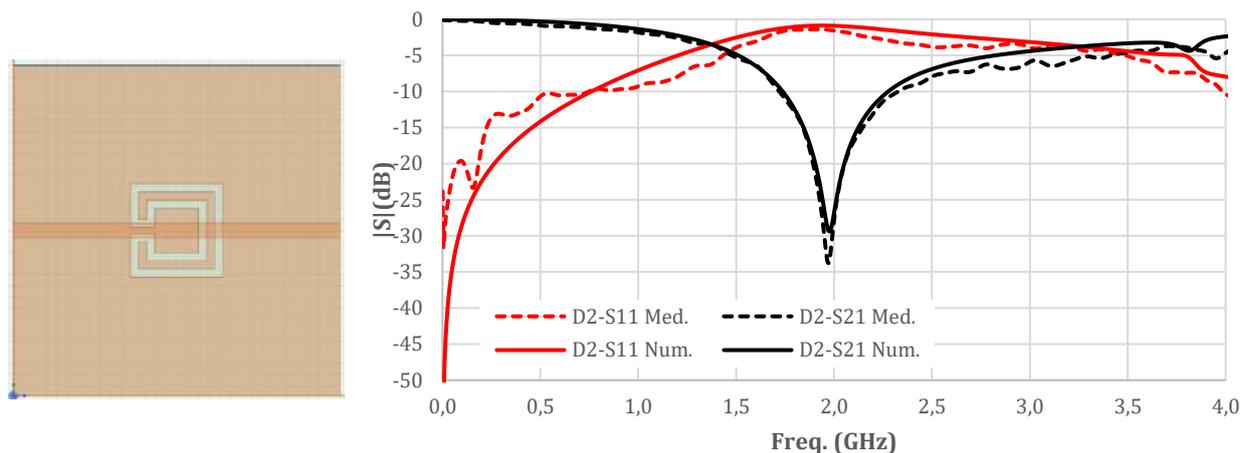
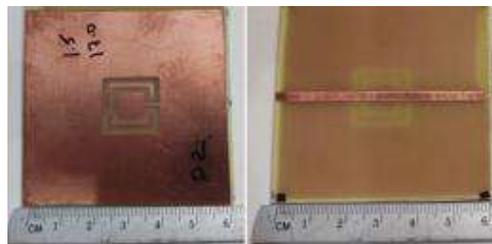


Figura 26 – $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-02, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$.

Os principais parâmetros avaliados no filtro 3D-2 e seus respectivos valores estão presentes na Tabela V.

Tabela V – Resultados para o filtro 3D-02

Parâmetro	Valor
w_{ma1}	17,0 mm
w_{ma2}	11,0 mm
w_{ma}	1,5 mm
Freq. res. num.	1,977 GHz
Freq. res. med.	1,977 GHz
Freq. res. calc.	2,195 GHz
BW (-3dB) num.	2,304 GHz
BW (-3dB) med.	2,94 GHz
BW (-10dB) num.	0,956 GHz
BW (-10dB) med.	0,604 GHz



O filtro 3D-02A apresenta uma abertura com relação ao filtro 3D-02 e, devido a isto, é esperado que a frequência de ressonância caia pela metade. A resposta em frequência $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$ do filtro 3D-02A pode ser observada na Figura 27. Os resultados experimentais apresentaram uma ótima concordância aos resultados numéricos, ficando a frequência de ressonância medida em 1,097 GHz e o valor numérico 1,069 GHz, apresentando uma diferença de 2,5%. Destaque-se que, comparado ao filtro 3D-02, verificou-se a redução na frequência de ressonância para quase a metade, assim como uma maior seletividade.

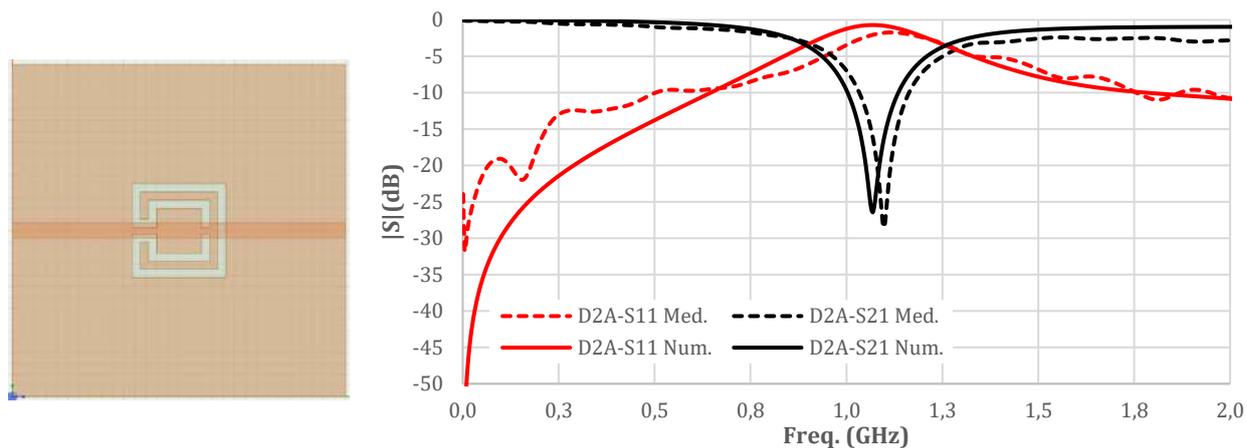
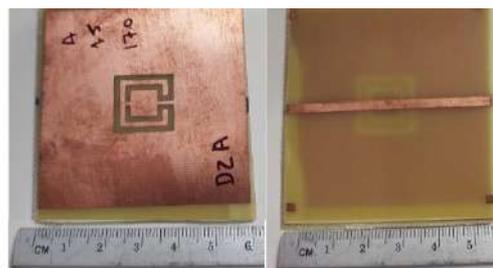


Figura 27 – $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-02A, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ m}$, aberto.

Os parâmetros avaliados no filtro 3D-02A e seus valores podem ser observados na Tabela VI.

Tabela VI – Resultados para o filtro 3D-02A

Parâmetro	Valor
wma1	17,0 mm
wma2	11,0 mm
wma	1,5 mm
Freq. res. num.	1,069 GHz
Freq. res. med.	1,097 GHz
Freq. res. calc.	1,097 GHz
BW (-3dB) num.	0,408 GHz
BW (-3dB) med.	0,528 GHz
BW (-10dB) num.	0,132 GHz
BW (-10dB) med.	0,128 GHz



A resposta em frequência $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$ do filtro 3D-03, construído com geometria matrioska de dois anéis retangulares concêntricos é apresentada na Figura 28. Os resultados experimentais apresentaram boa concordância aos resultados numéricos, ficando a frequência de ressonância medida em 2,305 GHz e o valor numérico com 2,273 GHz, uma diferença de 1,4%.

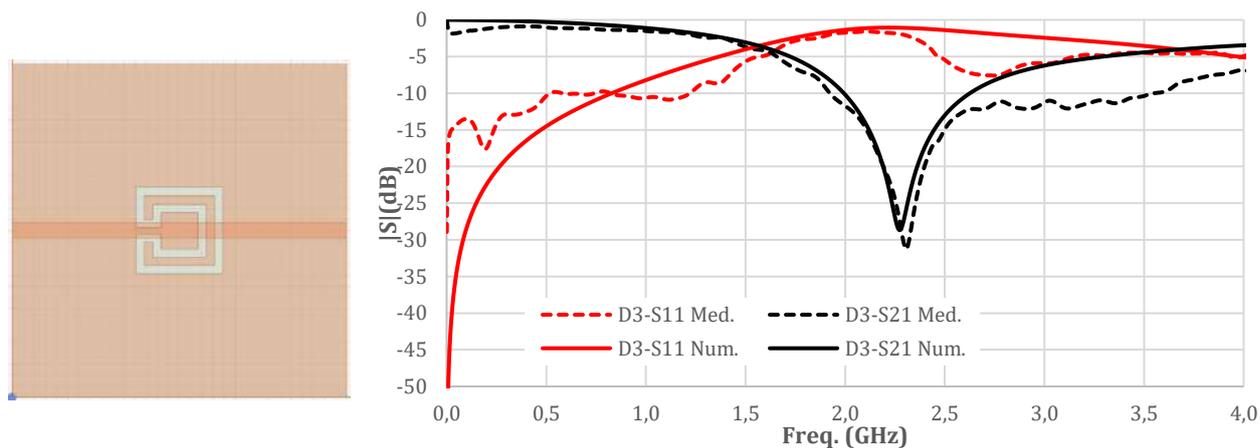
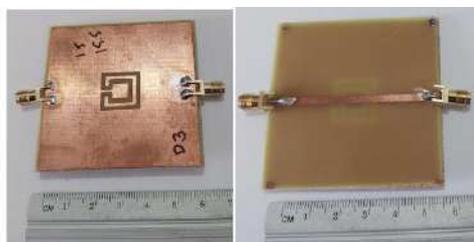


Figura 28 – $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-03, $w_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$.

Os parâmetros do filtro 3D-03 e seus valores podem ser observados na Tabela VII.

Tabela VII – Resultados para o filtro 3D-03

Parâmetro	Valor
w_{ma1}	15,5 mm
w_{ma2}	9,5 mm
w_{ma}	1,5 mm
Freq. res. num.	2,273 GHz
Freq. res. med.	2,305 GHz
Freq. res. calc.	2,495 GHz
BW (-3dB) num.	3,008 GHz
BW (-3dB) med.	-----
BW (-10dB) num.	0,632 GHz
BW (-10dB) med.	1,624 GHz



O filtro 3D-03A apresenta uma abertura com relação ao filtro 3D-03, com isto espera-se que a frequência de ressonância caia pela metade. A resposta em frequência $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$ do filtro 3D-03A pode ser observado na Figura 29. Os resultados experimentais demonstram uma excelente concordância aos resultados numéricos, a frequência de ressonância medida foi 1,205 GHz enquanto o valor numérico marcou 1,185 GHz, com uma diferença de 1,6%.

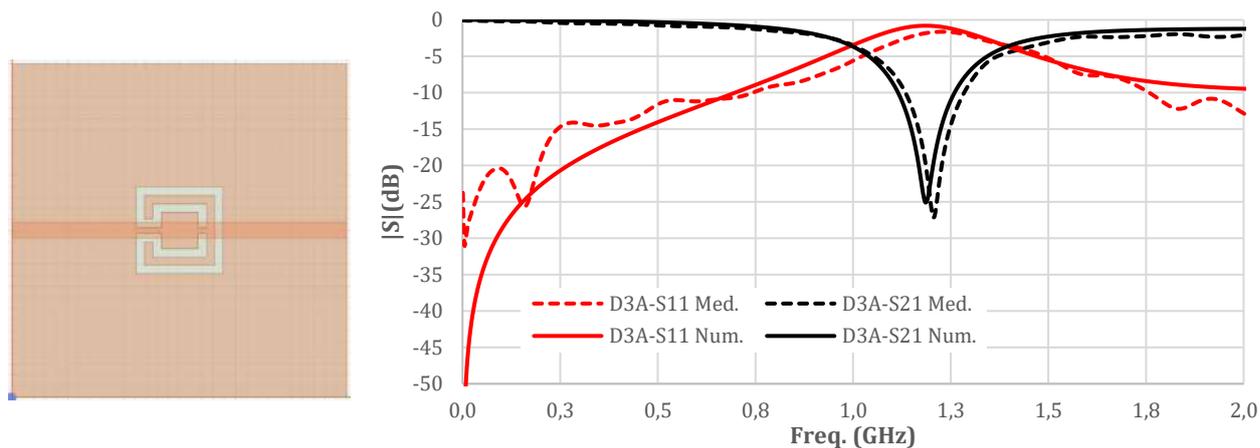
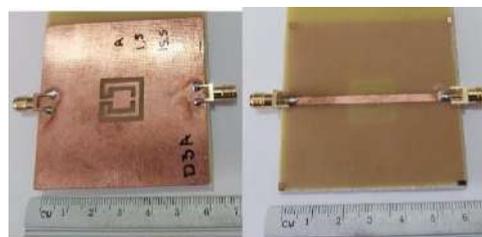


Figura 29 – $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-03A, $w_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$, aberto.

Os parâmetros do filtro 3D-03A e valores estão presentes na Tabela VIII.

Tabela VIII – Resultados para o filtro 3D-03A

Parâmetro	Valor
w_{ma1}	15,5 mm
w_{ma2}	9,5 mm
w_{ma}	1,5 mm
Freq. res. num.	1,185 GHz
Freq. res. med.	1,205 GHz
Freq. res. calc.	1,247 GHz
BW (-3dB) num.	0,46 GHz
BW (-3dB) med.	0,532 GHz
BW (-10dB) num.	0,144 GHz
BW (-10dB) med.	0,152 GHz



Comparando os filtros 3D-02(A) e 3D-03(A), verifica-se a possibilidade de ajustar a frequência de ressonância a partir da adequada especificação das dimensões.

Nesta etapa, foi variada a largura da fita do anel marioska, tendo sido considerada as dimensões do filtro 3D-03, variando a largura da fita. O filtro 3D-03B foi construído com uma fita de 1,0 mm. Comparado com o filtro 3D-03, observa-se uma redução na frequência de ressonância de 7,1 % e um aumento na seletividade de 65,7 %, considerando um limiar de -10

dB. A redução da frequência de ressonância ocorre devido ao aumento do comprimento efetivo médio do anel matrioska. A resposta em frequência $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$ do filtro 3D-03B é apresentada na Figura 30 e os parâmetros utilizados no filtro com seus respectivos valores estão na Tabela IX.

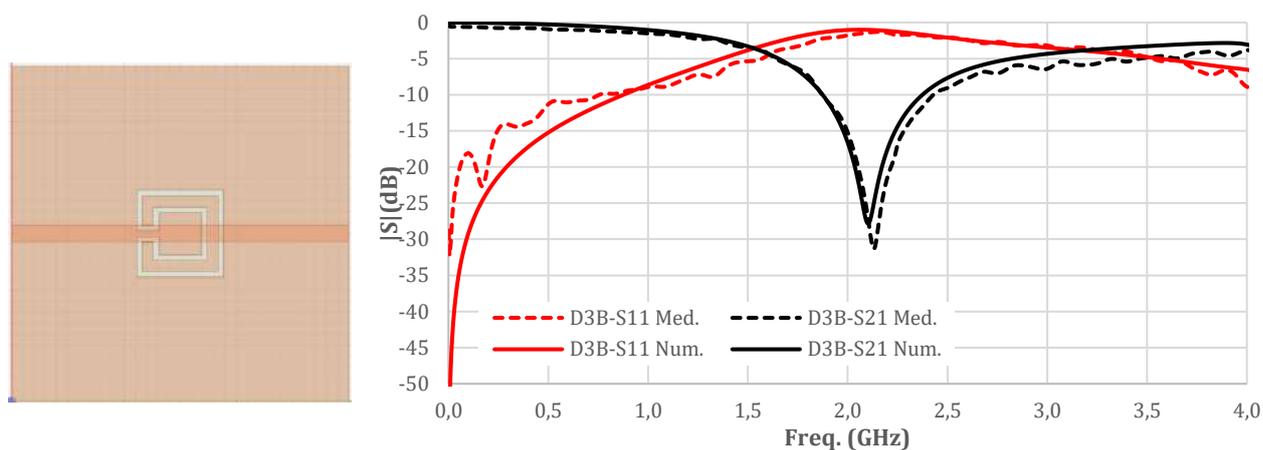
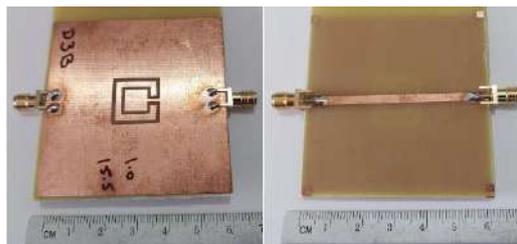


Figura 30 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-03B, $w_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0 \text{ mm}$.

Tabela IX – Resultados para o filtro 3D-03B

Parâmetro	Valor
w_{ma1}	15,5 mm
w_{ma2}	9,5 mm
w_{ma}	1,0 mm
Freq. res. num.	2,101 GHz
Freq. res. med.	2,141 GHz
Freq. res. calc.	2,386 GHz
BW (-3dB) num.	2,228 GHz
BW (-3dB) med.	3,084 GHz
BW (-10dB) num.	0,5 GHz
BW (-10dB) med.	0,556 GHz



Os resultados medidos apresentaram uma boa concordância com os resultados numéricos, sendo que a frequência de ressonância medida foi 2,141 GHz enquanto o valor numérico foi 2,101 GHz, uma diferença de 1,8%.

O filtro 3D-03C aberto, projetado com geometria matrioska para investigar suas características, foi feito com uma variação de 2,0 mm na largura da fita dos anéis concêntricos. Fazendo comparações com o filtro 3D-03A que possui uma única diferença física ($w_{ma} = 1,5$ mm). Observa-se um aumento na frequência de ressonância em 7,0 % e um aumento na seletividade em 2,5 %, observando um limiar de -10dB. A resposta em frequência $|S|(dB) \times$ Freq. (GHz) do filtro 3D-03C é apresentada na Figura 31 e os principais parâmetros utilizados no filtro com seus respectivos valores estão na Tabela X. O aumento da frequência de ressonância ocorre em função do aumento do valor médio do comprimento efetivo do anel matrioska. Ou seja, essa condição é válida para anéis abertos e fechados.

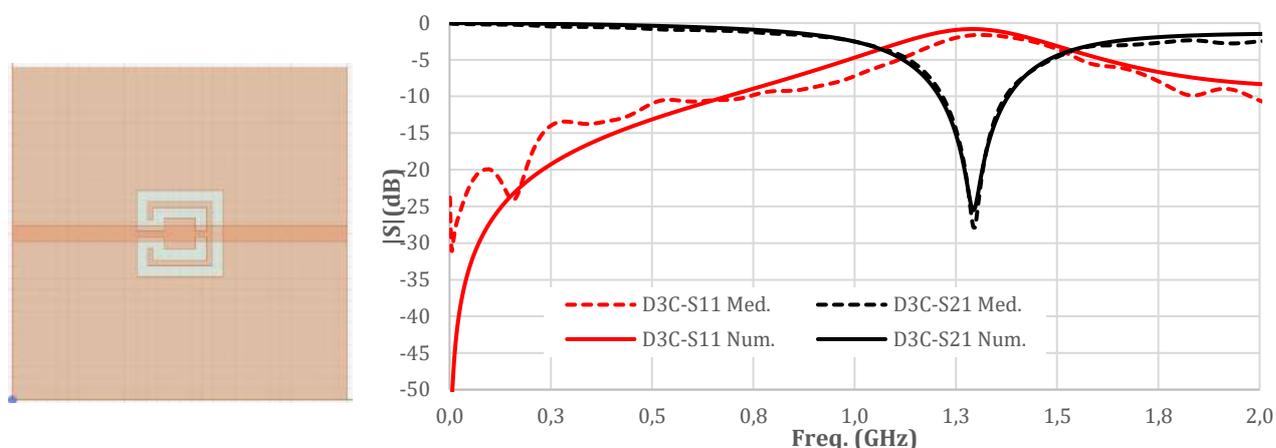
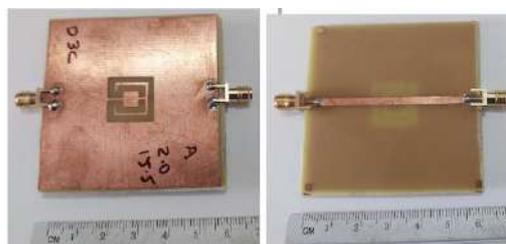


Figura 31 – $|S|(dB) \times$ Freq. (GHz), 3D-03C, $w_{ma1} = 15,5$ mm, $w_{ma} = 2,0$ mm, aberto.

Tabela X – Resultados para o filtro 3D-03C

Parâmetro	Valor
w_{ma1}	15,5 mm
w_{ma2}	9,5 mm
w_{ma}	2,0 mm
Freq. res. num.	1,293 GHz
Freq. res. med.	1,297 GHz
Freq. res. calc.	1,037 GHz
BW (-3dB) num.	0,552 GHz
BW (-3dB) med.	0,632 GHz
BW (-10dB) num.	0,168 GHz
BW (-10dB) med.	0,156 GHz



A resposta em frequência $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$ do filtro 3D-04, desenvolvido com geometria matrioska de dois anéis retangulares concêntricos é exemplificado na Figura 32. Os resultados experimentais mostraram excelente concordância as soluções simuladas, a frequência de ressonância medida foi 2,757 GHz e o valor numérico da frequência simulada ficou em 2,733 GHz, demonstrando uma diferença de 0,8%. Os parâmetros utilizados no filtro 3D-04 e valores estão presentes na Tabela XI. Verifica-se novamente a possibilidade de ajuste da frequência de ressonância a partir da escolha adequada das dimensões.

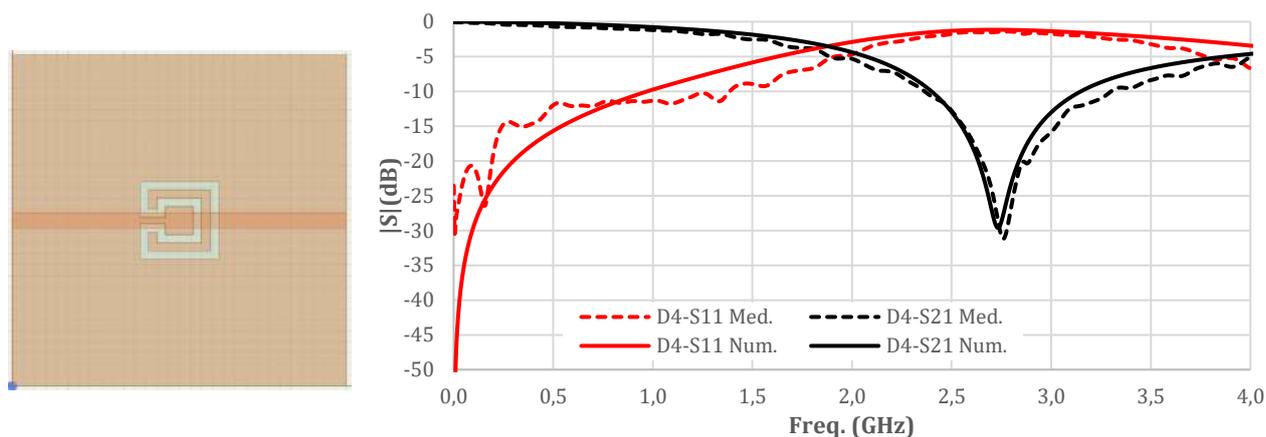
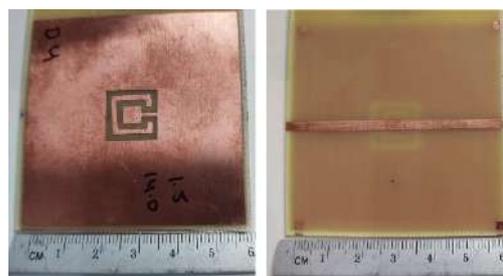


Figura 32 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-04, $w_{ma1} = 14,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$.

Tabela XI – Resultados para o filtro 3D-04

Parâmetro	Valor
w_{ma1}	14,0 mm
w_{ma2}	8,0 mm
w_{ma}	1,5 mm
Freq. res. num.	2,733 GHz
Freq. res. med.	2,757 GHz
Freq. res. calc.	2,889 GHz
BW (-3dB) num.	3,504 GHz
BW (-3dB) med.	-----
BW (-10dB) num.	0,748 GHz
BW (-10dB) med.	0,936 GHz



Considerando as características da geometria matrioska o filtro 3D-04A foi desenvolvido com uma abertura com relação ao filtro 3D-04 e devido a isto é esperado que a

frequência de ressonância diminua pela metade. A resposta em frequência $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$ do filtro 3D-04A é exemplificada na Figura 33. Os resultados experimentais apresentaram uma boa concordância frente aos resultados numéricos das simulações, ficando a frequência de ressonância medida em 1,361 GHz e o valor numérico das simulações em 1,349 GHz, apresentando uma diferença de 0,8%.

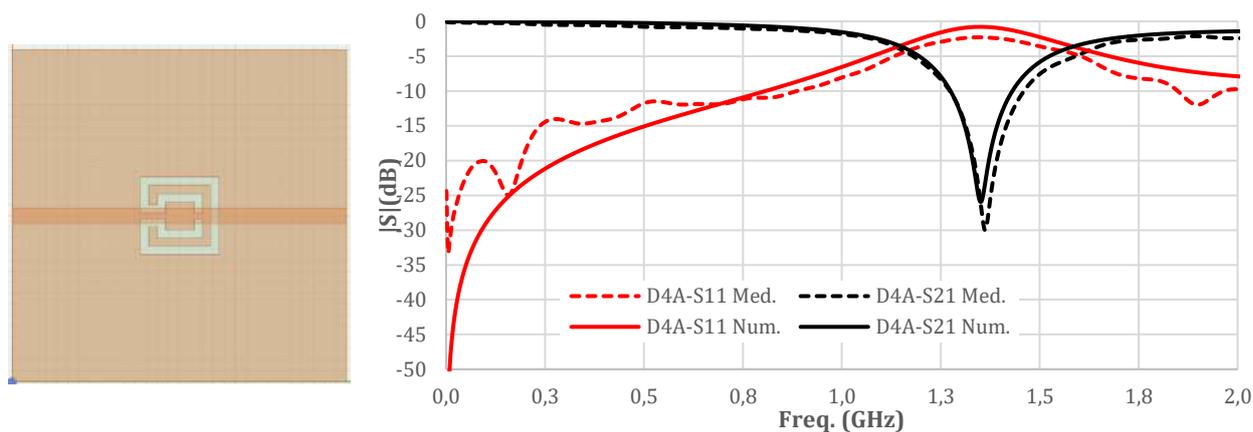
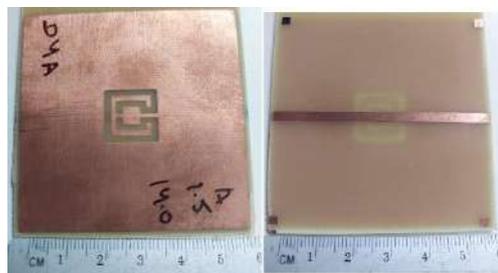


Figura 33 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-04A, $w_{ma1} = 14,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$, aberto.

Na Tabela XII consta os valores dos principais parâmetros utilizados no filtro 3D-04A.

Tabela XII – Resultados para o filtro 3D-04A

Parâmetro	Valor
w_{ma1}	14,0 mm
w_{ma2}	8,0 mm
w_{ma}	1,5 mm
Freq. res. num.	1,349 GHz
Freq. res. med.	1,361 GHz
Freq. res. calc.	1,444 GHz
BW (-3dB) num.	0,508 GHz
BW (-3dB) med.	0,584 GHz
BW (-10dB) num.	0,16 GHz
BW (-10dB) med.	0,188 GHz



A resposta em frequência $|S|(\text{dB})$ por Freq. (GHz) do filtro 3D-05, caracterizado com geometria matrioska de dois anéis retangulares concêntricos é mostrado na Figura 34. Os resultados medidos em laboratório demonstraram excelente concordância as soluções simuladas. A frequência de ressonância medida ficou em 3,565 GHz e o valor numérico da frequência simulada foi de 3,513 GHz, mostrando uma diferença de 1,4%. Os principais parâmetros utilizados no filtro 3D-05 e valores estão presentes na Tabela XIII.

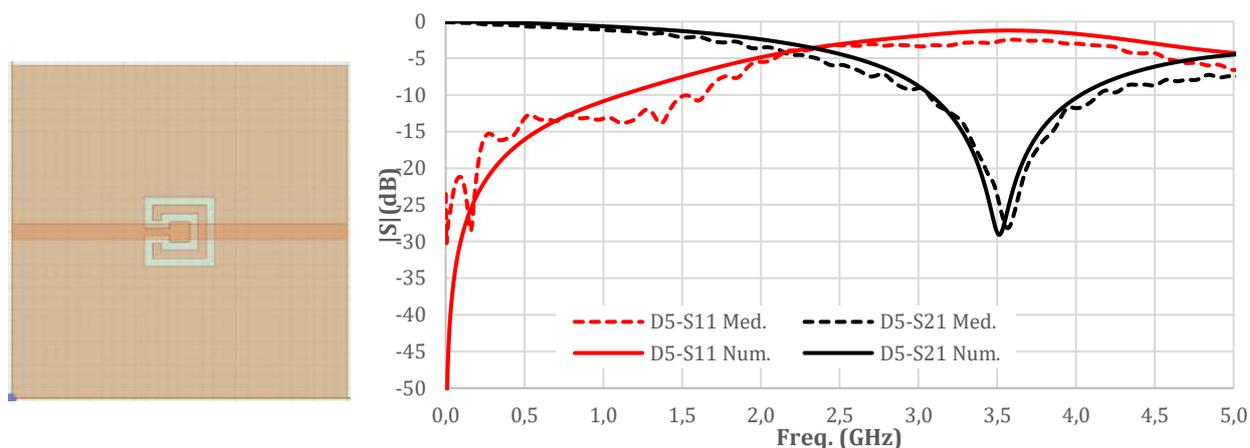
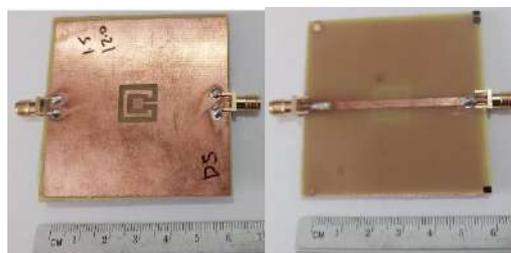


Figura 34 – $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-05, $w_{ma1} = 12,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$.

Tabela XIII – Resultados para o filtro 3D-05

Parâmetro	Valor
w_{ma1}	12,5 mm
w_{ma2}	6,5 mm
w_{ma}	1,5 mm
Freq. res. num.	3,513 GHz
Freq. res. med.	3,565 GHz
Freq. res. calc.	3,430 GHz
BW (-3dB) num.	4,203 GHz
BW (-3dB) med.	-----
BW (-10dB) num.	0,952 GHz
BW (-10dB) med.	1,076 GHz



O filtro 3D-05A aberto tem as mesmas dimensões com o filtro 3D-05, sendo, porém, aberto. Em relação ao filtro com o anel fechado, a frequência de ressonância caiu em 43,9 % e um aumento na seletividade de 82,5 %, analisando um limiar de -10dB. A resposta em frequência $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$ do filtro 3D-05A é apresentada na Figura 35. Os principais parâmetros utilizados no filtro com seus respectivos valores são exemplificados na Tabela XIV.

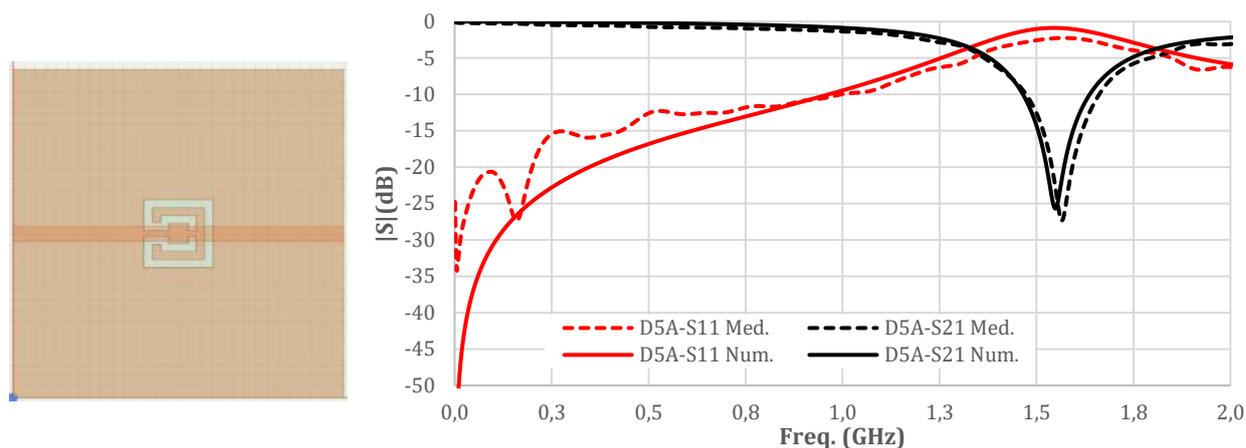
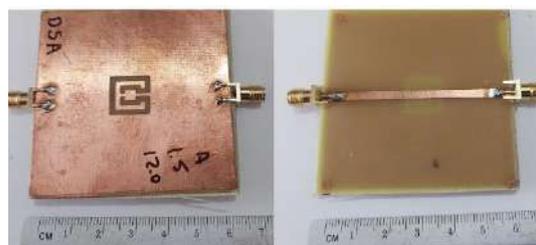


Figura 35 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-05A, $w_{ma1} = 12,5 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,5 \text{ mm}$, aberto.

Tabela XIV – Resultados para o filtro 3D-05A

Parâmetro	Valor
wma1	12,5 mm
wma2	6,5 mm
wma	1,5 mm
Freq. res. num.	1,549 GHz
Freq. res. med.	1,565 GHz
Freq. res. calc.	1,715 GHz
BW (-3dB) num.	0,572 GHz
BW (-3dB) med.	0,652 GHz
BW (-10dB) num.	0,172 GHz
BW (-10dB) med.	0,188 GHz



A frequência de ressonância medida ficou em 1,565 GHz enquanto o valor numérico da frequência de ressonância simulado foi 1,549 GHz, observando-se uma diferença de 1,0%.

Em resumo, com os filtros de dois anéis foram confirmadas a possibilidade do ajuste da frequência de ressonância a partir das dimensões, assim como o efeito da largura da fita no comprimento médio efetivo do anel matrioska. Confirmou-se ainda que os anéis abertos apresentam praticamente uma frequência de ressonância igual à metade, quando comparados aos anéis fechados, assim como são mais seletivos.

3.2.2 Filtros DGSs baseados na geometria matrioska – três anéis

Nesta seção da dissertação é avaliado o funcionamento filtros DGSs baseados na geometria matrioska, com três anéis.

Nesta etapa de apresentação de resultados foram construídos quatro filtros planares com geometria matrioska, ocupando praticamente a mesma área do anel mais externo ($w_{ma1} = 17,0$ mm) e a largura da fita dos anéis concêntricos medindo 1,0 mm. Partiu-se de um filtro com dois anéis e foi inserido um terceiro anel.

Nas primeiras avaliações realizadas no comportamento do filtro 3D-06, caracterizado com geometria matrioska com dois anéis concêntricos retangulares, apresentou uma resposta em frequência $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$ exemplificado na Figura 36. Os resultados medidos em laboratório apresentaram uma concordância muito boa, quando comparados aos resultados simulados. O valor medido para frequência de ressonância foi 1,737 GHz enquanto o valor numérico da frequência simulada foi de 1,765 GHz, uma diferença de 1,5%. Os principais parâmetros do filtro 3D-06 e valores estão descritos na Tabela XV.

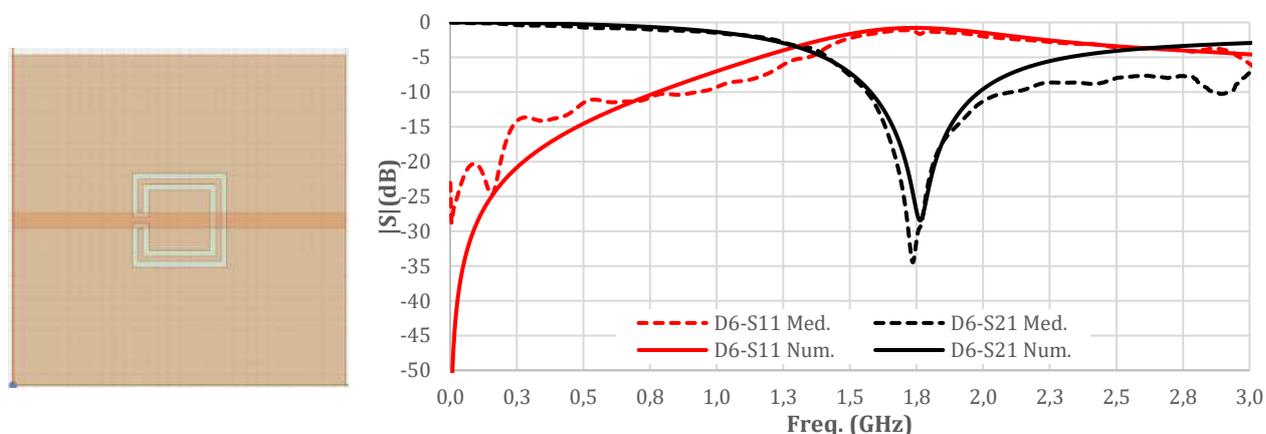
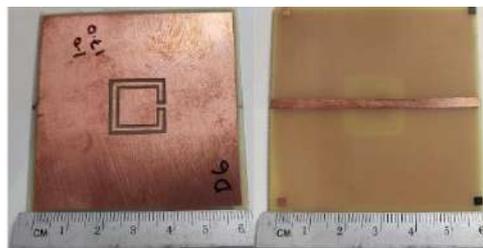


Figura 36 – $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-06, $w_{ma1} = 17,0$ mm, $w_{ma} = 1,0$ mm.

Tabela XV – Resultados para o filtro 3D-06

Parâmetro	Valor
wma1	17,0 mm
wma2	13,0 mm
wma	1,0 mm
Freq. res. num.	1,765 GHz
Freq. res. med.	1,737 GHz
Freq. res. calc.	1,960 GHz
BW (-3dB) num.	1,716 GHz
BW (-3dB) med.	1,737 GHz
BW (-10dB) num.	0,408 GHz
BW (-10dB) med.	0,544 GHz



Com a inserção do terceiro anel concêntrico, um anel matrioska, filtro 3D-06A, quando comparado ao filtro com dois anéis concêntricos, um anel matrioska, filtro 3D-06, ao contrário do esperado, houve um aumento da frequência de ressonância de 9,9%. Por outro lado, o filtro passou a apresentar uma segunda frequência de ressonância e, conseqüentemente, uma maior largura de banda de rejeição. A resposta em frequência $|S|(dB) \times \text{Freq. (GHz)}$ do filtro 3D-06A é apresentada na Figura 37. Os resultados experimentais apresentaram uma excelente concordância frente aos resultados numéricos das simulações, a frequência de ressonância medida foi 1,929 GHz e o valor numérico das simulações ficou em 1,899 GHz, com uma diferença de 1,5%. Entretanto, as equações para a estimativa da frequência de ressonância não se mostraram adequadas, o que irá requerer um estudo posterior para o melhor entendimento dessa configuração de filtro.

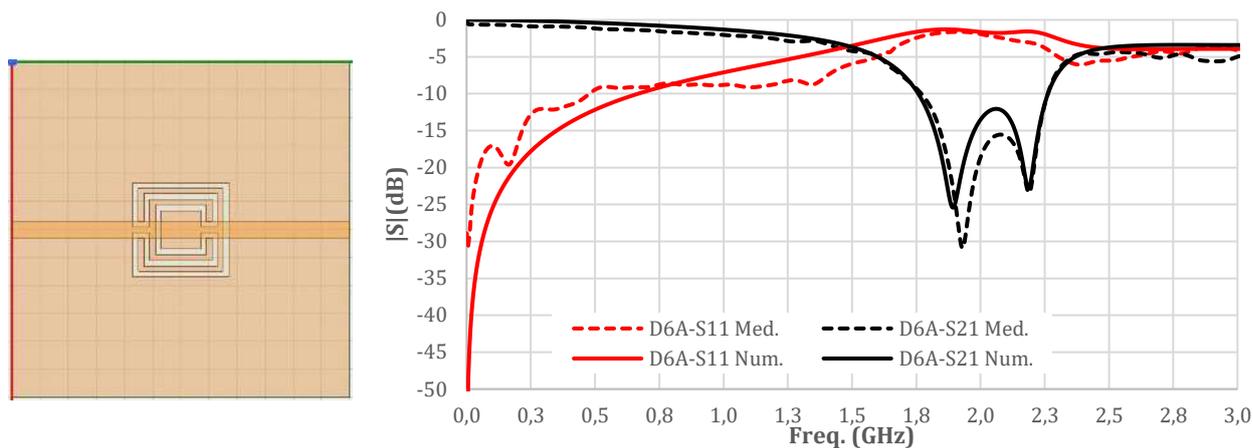
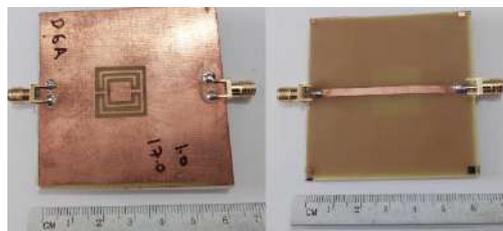


Figura 37 – $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-06A, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0 \text{ mm}$.

Os parâmetros analisados estão descritos na Tabela XVI.

Tabela XVI – Resultados para o filtro 3D-06A

Parâmetro	Valor
w_{ma1}	17,0 mm
w_{ma2}	13,0 mm
w_{ma3}	9,0 mm
w_{ma}	1,0 mm
Freq. res. num.	1,899 GHz
Freq. res. med.	1,929 GHz
Freq. res. calc.	1,630 GHz
BW (-3dB) num.	2,308 GHz
BW (-3dB) med.	2,544 GHz
BW (-10dB) num.	0,408 GHz
BW (-10dB) med.	0,492 GHz



O filtro 3D-06B foi desenvolvido com geometria matrioska de quatro anéis concêntricos e retangulares, três anéis matrioska, fazendo uma comparação com filtro 3D-06, verificou-se uma redução na frequência em 6,5% e um aumento na seletividade de 34,9% observando o limiar em -10 dB. A resposta em frequência $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$ do filtro 3D-06B é apresentada na Figura 38. Os resultados medidos tiveram uma ótima concordância com os resultados numéricos, a medida da frequência no protótipo físico foi 1,773 GHz enquanto

valor numérico ficou em 1,657 GHz, indicando uma diferença de 1,5%. Para facilitar a visualização dos parâmetros analisados e seus respectivos valores, veja a Tabela XVII.

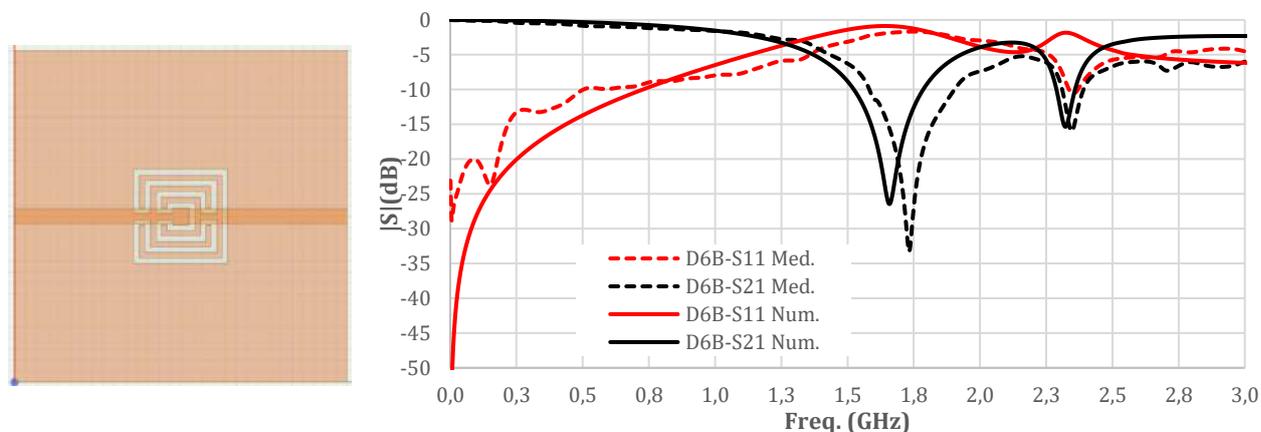
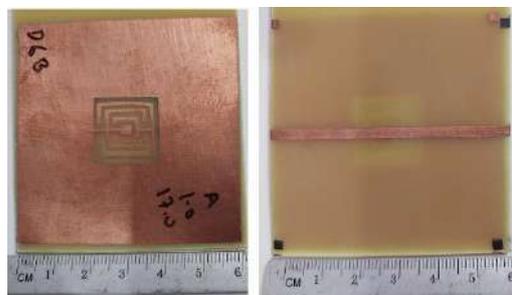


Figura 38 – $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-06B, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0 \text{ mm}$.

Tabela XVII – Resultados para o filtro 3D-06B

Parâmetro	Valor
w_{ma1}	17,0 mm
w_{ma2}	13,0 mm
w_{ma3}	9,0 mm
w_{ma4}	5,0 mm
w_{ma}	1,0 mm
Freq. res. num.	1,657 GHz
Freq. res. med.	1,773 GHz
Freq. res. calc.	1,497 GHz
BW (-3dB) num.	1,336 GHz
BW (-3dB) med.	-----
BW (-10dB) num.	0,26 GHz
BW (-10dB) med.	0,32 GHz



Finalizando a lista de filtros desenvolvidos nesta dissertação, o filtro 3D-06C foi construído com geometria matrioska de quatro anéis concêntricos e retangulares, da mesma forma que o filtro anterior, porém com um anel aberto, o que produz uma redução na frequência de ressonância de 51,7% e um aumento na seletividade de 80,0% considerando o limiar em -10 dB. A resposta em frequência $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$ do filtro 3D-06C é apresentada na

Figura 39. Os resultados medidos mostraram excelente concordância com os resultados numéricos. A frequência de ressonância experimental foi 0,837 GHz enquanto valor numérico mostrou 0,809 GHz, indicando uma diferença de 3,3%. Na Tabela XVIII há uma demonstração dos parâmetros analisados e seus respectivos valores.

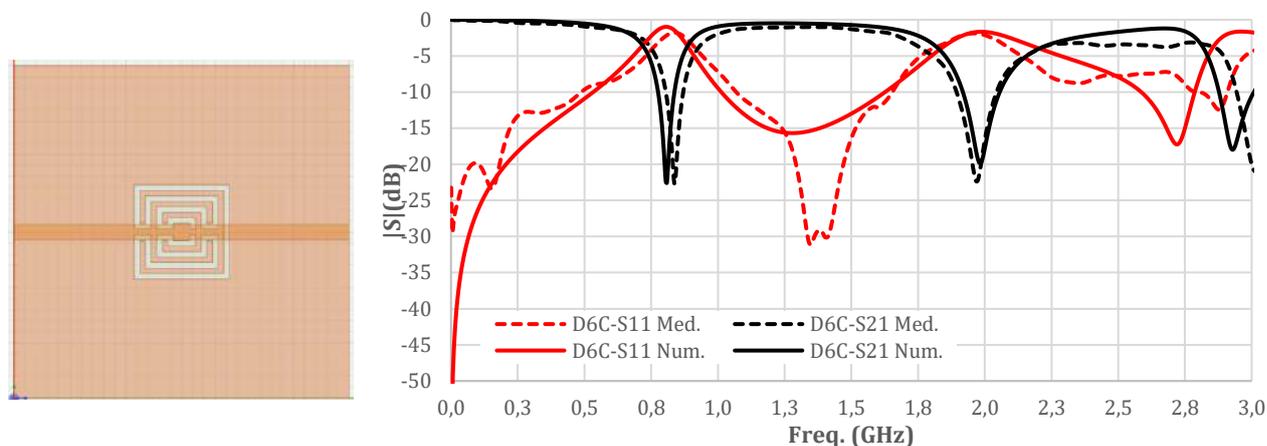
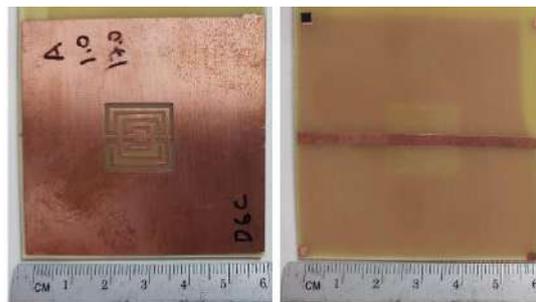


Figura 39 – $|S|(\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, 3D-06C, $w_{ma1} = 17,0 \text{ mm}$, $w_{ma} = 1,0 \text{ mm}$, aberto.

Tabela XVIII – Resultados para o filtro 3D-06C

Parâmetro	Valor
wma1	17,0 mm
wma2	13,0 mm
wma3	9,0 mm
wma4	5,0 mm
wma	1,0 mm
Freq. res. num.	0,809 GHz
Freq. res. med.	0,837 GHz
Freq. res. calc.	0,748 GHz
BW (-3dB) num.	0,192 GHz
BW (-3dB) med.	0,22 GHz
BW (-10dB) num.	0,06 GHz
BW (-10dB) med.	0,064 GHz



Neste Capítulo foi apresentado um considerável volume de resultados numéricos e experimentais sobre os filtros DGSs matrioska. Certamente, esses resultados contribuem para um melhor entendimento desses filtros, suas vantagens, desvantagens e potencialidades.

4 CONCLUSÃO

Nesta dissertação foi apresentado um estudo dos filtros DGSs baseados na geometria matrioska. Entre as contribuições desta dissertação, podem ser citadas:

- a) Apresentação da configuração do filtro DGS matrioska;
- b) Estabelecimento das equações iniciais de projeto, que se mostraram válidas para os filtros com um anel e com dois anéis matrioska;
- c) Comparação da resposta em frequência dos filtros DGSs matrioska e haltere, confirmando as características de miniaturização e seletividade dos filtros DGSs matrioska;
- d) Avaliação do efeito da largura da fita e da utilização do anel aberto na configuração DGS matrioska;
- e) Caracterização numérica e experimental de filtros DGSs matrioska com mais de um anel.

Essas contribuições foram consolidadas a partir de um consistente estudo numérico e experimental, compreendendo a caracterização de quatorze filtros DGSs matrioska.

Entre as limitações identificadas, destaca-se que as equações iniciais de projeto dos filtros DGSs matrioska com mais de um anel matrioska não apresentaram resultados satisfatórios.

Para continuação desta dissertação, são apresentadas as seguintes sugestões:

- i) Caracterização de filtros DGSs matrioska em série e em paralelo;
- ii) Aplicação de filtros DGSs matrioska na supressão de modos em antenas planares.

Diante o exposto, foram desenvolvidos e caracterizados filtros planares DGSs baseados na geometria matrioska com um anel concêntrico e filtros DGSs com geometria haltere, em material FR-4, considerando os efeitos da geometria matrioska na resposta em frequência e propostos para as aplicações selecionadas. Também foram fabricados e caracterizados protótipos de filtros planares baseados na geometria matrioska com dois e três anéis concêntricos, com diferentes configurações na estrutura geométrica, uma novidade com relação a trabalhos anteriores.

De maneira inicial, houve uma revisão das bibliografias relativa ao projeto para compreender os conceitos básicos dos filtros propostos, em especial os filtros planares na faixa de micro-ondas, assimilando as características da geometria matrioska, incluindo as equações iniciais de projeto, seus princípios básicos, características e aplicações. A aplicabilidade das equações iniciais de projeto e confirmação das características da geometria matrioska foram observados na seção 4.1 e os resultados numéricos e experimentais para os filtros DGSs matrioska de micro-ondas são apresentados a partir da seção 4.2, incluindo os filtros com dois e três anéis.

REFERÊNCIAS

- [1] POSITIVO TECNOLOGIA. “O Papel da tecnologia na construção de cidades inteligentes,” Disponível em: <https://www.meupositivo.com.br/panoramapositivo/o-papel-da-tecnologia-na-construcao-de-cidades-inteligentes/>. Acesso em: 14 fevereiro 2022.
- [2] Júlio Cesar de Oliveira Medeiros, **Princípios de Telecomunicações: teoria e prática**, 5ª ed. rev., Érica, São Paulo, 2016.
- [3] E. Batista da Silva, P. A. Ramalho de Souza, R. Nader, “Tendências no âmbito da internet das coisas: um estudo patentário,” *Innovar*, vol. 31, n. 81, pp. 49-60, Julio-Septiembre, 2021. <https://doi.org/10.15446/innovar.v31n81.95572>.
- [4] M. S. M. Gismalla *et al.*, "Survey on Device to Device (D2D) Communication for 5GB/6G Networks: Concept, Applications, Challenges, and Future Directions," in *IEEE Access*, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3160215.
- [5] P. Dhawankar *et al.*, "Next-Generation Indoor Wireless Systems: Compatibility and Migration Case Study," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 156915-156929, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3126827.
- [6] R. A. Gheorghiu, V. Iordache and I. Badescu, "Analysis of possible Wi-Fi interferences of wireless communications implemented in vehicular environments," *2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, 2017, pp. 244-247, doi: 10.1109/TELSKS.2017.8246273.
- [7] R. Maldonado *et al.*, "Comparing Wi-Fi 6 and 5G Downlink Performance for Industrial IoT," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 86928-86937, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3085896.
- [8] ANATEL, Panorama de Radiofrequências da Telefonia Móvel no Brasil – 2021, Relatório, Brasil, 2021.
- [9] ANATEL, Regulamento do Uso do Espectro de Radiofrequências. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2016/911resolu%C3%A7%C3%A3o-671#art1/>>. Acesso em 20/03/2022.
- [10] SANTAELLA, L.; GALA, A.; POLICARPO, C.; GAZONI, R. Desvelando a Internet das Coisas. Revista GEMInIS, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 19–32, 2013. Disponível em: <https://www.revistageminis.ufscar.br/index.php/geminis/article/view/141>. Acesso em: 22 abr. 2022.
- [11] O. Olukoya and D. Budimir, "Inkjet-printed bandstop filters for interference suppression in multi-standard wireless systems," *2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/APMC.2016.7931399.
- [12] 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, Rio Grande do Sul, Brasil, 25–29 de julho, 2016, pp. 1-5.

- [13] 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. 366 - 370.
- [14] Josefa Gilliane de Oliveira Mariano, **Implementação de Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska**, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2017.
- [15] L. H. Weng, Y. C. Guo, X. W. Shi, and X. Chen, "An Overview on defected ground structure," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 7, pp. 173-189, 2008. doi:10.2528/PIERB08031401
- [16] J. Zhou, Y. Rao, D. Yang, H. J. Qian and X. Luo, "Compact wideband BPF with wide stopband using substrate integrated defected ground structure," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 31, no. 4, pp. 353-356, April 2021, doi: 10.1109/LMWC.2021.3053756.
- [17] S. Cao, Y. Han, H. Chen and J. Li, "An Ultra-Wide Stop-Band LPF Using Asymmetric Pi-Shaped Koch Fractal DGS," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 27126-27131, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2773577.
- [18] M. Farooq, A. Abdullah, M. A. Zakir and H. M. Cheema, "Miniaturization of a 3-way power divider using defected ground structures," *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2019, pp. 1503-1505, doi: 10.1109/APMC46564.2019.9038858.
- [19] Seongmin Oh, Jae-Jin Koo, Mun-Su Hwang, Chunseon Park, Yong-Chae Jeong, Jong-Sik Lim, Kwan-Sun Choi, and Dal Ahn, "An unequal Wilkinson power divider with variable dividing ratio," *2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, 2007, pp. 411-414, doi: 10.1109/MWSYM.2007.380475.
- [20] S. Pandit, P. Ray and A. Mohan, "Compact MIMO antenna enabled by DGS for WLAN applications," *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2018, pp. 35-36, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609389.
- [21] F. A. A. de Souza, A. L. P. S. Campos, A. Gomes Neto, A. J. R. Serres, and C. C. R. Albuquerque, "Higher order mode attenuation in microstrip patch antenna with DGS H filter specification from 5 to 10 GHz range," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*, vol. 19, no. 2, pp. 214–227, June 2020, doi.org/10.1590/2179-10742020v19i2823
- [22] E. Mansour, A. Allam and A. B. Abdel-Rahman, "A novel approach to non-invasive blood glucose sensing based on a defected ground structure," *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2021, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411425.
- [23] J. G. D. Oliveira, J. G. Duarte Junior, E. N. M. G. Pinto, V. P. Silva Neto, and A. G. D'Assunção, "A new planar microwave sensor for building materials complex permittivity characterization," *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 6328. <https://doi.org/10.3390/s20216328>

- [24] K. Dautov, M. Hashmi, G. Nauryzbayev and N. Nasimuddin, "Recent advancements in defected ground structure-based near-field wireless power transfer systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 81298-81309, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991269.
- [25] S. Hekal, A. B. Abdel-Rahman, H. Jia, A. Allam, A. Barakat and R. K. Pokharel, "A novel technique for compact size wireless power transfer applications using defected ground structures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 2, pp. 591-599, Feb. 2017, doi: 10.1109/TMTT.2016.2618919.
- [26] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, A. J. R. Serres, M. de O. Alencar1, I. B. G. Coutinho, T. da S. Evangelista, "Dual-band band-pass frequency selective surface based on the matryoshka geometry with angular stability and polarization independence," *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2020, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135542.
- [27] Marina de Oliveira Alencar, **Desenvolvimento de FSS com Resposta Passa-faixa Baseada na Geometria Matroska**, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2020.
- [28] <http://www.hp.woodshot.com>, acessado em 15/06/2023.
- [29] Alfrêdo Gomes Neto, Jefferson Costa e Silva, Ianes Barbosa Grécia Coutinho, Saulo Souto Camilo Filho, Danila Araújo Santos, Bruno Lima Cavalcanti de Albuquerque, "A Defected Ground Structure Based on Matryoshka Geometry," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 21 (J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl., 2022 21(2)), 284–293. <https://doi.org/10.1590/2179-10742022v21i2256115>.
- [30] Mukesh Kumar Khandelwal, Binod Kumar Kanaujia, Sachin Kumar "Defected Ground Structure: Fundamentals, Analysis, and Applications in Modern Wireless Trends," *Hindawi International Journal of Antennas and Propagation Volume 2017*, Article ID 2018527, 22 pages <https://doi.org/10.1155/2017/2018527>
- [31] J. I. Park, C. S. Kim, J. Kim, et al., "Modeling of a photonic bandgap and its application for the low-pass filter design," *Asia Pacific Microwave Conference*, Vol. 2, pp. 331-334, 1999.
- [32] 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, 173–189, 2008
- [33] Ansys Eletromagnetics Suite 19.1. Disponível em: <<http://www.ansys.com>>. Acesso em 22/06/2022.