



Myllenna Correia de Andrade

DESENVOLVIMENTO DE FILTROS DGS-MATRIOSKA COMPACTOS UTILIZANDO RESSONADOR DIELÉTRICO

Orientador: Alfrêdo Gomes Neto, Dr.

João Pessoa - PB
2024

Mylenna Correia de Andrade

**DESENVOLVIMENTO DE FILTROS DGS-MATRIOSKA
COMPACTOS UTILIZANDO RESSONADOR DIELÉTRICO**

Dissertação de Mestrado submetida 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

João Pessoa – PB
2024

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

A554d Andrade, Mylenna Correia de.

Desenvolvimento de filtros DGS - matrioska compactos
utilizando ressonador dielétrico / Mylenna Correia de Andrade.
– 2024.

76 f. : il.

Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto
Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2024.

Orientação : Prof^o Dr Alfrêdo Gomes Neto.

1. DGS. 2. Matrioska. 3. Ressonador dielétrico. 4. Minia-
turização. 5. Seletividade. I. Título.

CDU 621.372.852.1(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MYLENNNA CORREIA DE ANDRADE

DESENVOLVIMENTO DE FILTROS DGS-MATRIOSKA COMPACTOS UTILIZANDO
RESSONADOR DIELÉTRICO

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 e Tecnologia da Paraíba – IFPB - Campus João Pessoa.

Aprovado em 21 de novembro de 2024

Membros da Banca Examinadora:

Dr. Alfredo Gomes Neto

IFPB – PPGEE

Dr. Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos

UFRN

Dr. Joabson Nogueira de Carvalho

IFPB – PPGEE

Dr. Gustavo Araujo Cavalcante

IFPB – PPGEE

João Pessoa/2024

Documento assinado eletronicamente por:

- **Alfredo Gomes Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 21/11/2024 10:37:10.
- **Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos, PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL**, em 21/11/2024 11:04:06.
- **Gustavo Araujo Cavalcante, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 21/11/2024 11:41:17.
- **Joabson Nogueira de Carvalho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 21/11/2024 15:06:29.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/10/2024. 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 624503
Verificador: f924e0e00f
Código de Autenticação:



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

A Deus, por ser minha rocha e fortaleza, sempre me dando forças e se fazendo presente nos momentos mais difíceis da minha vida. À minha mãe, por ser exemplo e inspiração de determinação na minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me permitido chegar até aqui, por ter me concedido força, sabedoria, ânimo, entre outras coisas que não sou capaz de explicar.

À minha mãe e ao meu irmão, por todo apoio e compreensão, sempre dispostos a me ouvir nos momentos mais difíceis e sempre me encorajaram a continuar e me manter firme na caminhada.

Aos meus familiares, que sempre compreenderam o motivo das minhas ausências em momento festivos.

Ao meu orientador, Professor Alfrêdo, por toda paciência e compreensão, sua orientação e apoio foram essenciais para que eu conseguisse chegar até aqui.

A todos os colegas do mestrado, pelo apoio e participação, direta ou indiretamente desta pesquisa e por todo o incentivo durante os anos do mestrado.

RESUMO

Nesta pesquisa é proposta a miniaturização de um filtro baseado em uma estrutura com defeito no plano terra, DGS (*defected ground structure*), baseada na geometria matrioska, utilizando um ressonador dielétrico, DR (*dielectric resonator*). São apresentadas as equações iniciais de projeto e discutida a variação da resposta em frequência quando ocorre mudança no posicionamento e nas dimensões do DR. Para verificar as características esperadas (miniaturização, seletividade e sintonia da frequência de ressonância), quatro filtros DGS-matrioska com dimensões diferentes foram fabricadas e caracterizadas, tendo sido utilizada uma cerâmica de alta permissividade (MCT-115, $\epsilon_r = 115$) como DR. Sem a utilização do DR, a variação das dimensões da DGS-matrioska, resultou em alterações na frequência de ressonância e na largura de banda. Neste caso, observou-se que, com a menor dimensão da DGS, foram obtidos valores maiores tanto para a frequência de ressonância quanto para a largura de banda. Ao utilizar o DR na DGS-matrioska ocorre uma redução na frequência de ressonância e na largura de banda, sendo esta redução mais significativa com o DR localizado na quina das DGSs. A análise da densidade de corrente, revelou que esta redução mais significativa quando o DR é posicionado na quina, deve-se ao fato de que, nesta posição, o DR interagir de forma mais intensa com o campo. A frequência de ressonância das DGSs variou de 3,84 GHz para 0,75 GHz, representando uma redução de até 80% com a aplicação do DR. Já a largura de banda variou de 1,02 GHz para 0,06 GHz, representando uma redução de até 94% com a aplicação do DR. Os resultados numéricos e experimentais obtidos apresentaram boa concordância, e as equações iniciais de projeto mostraram-se viáveis, o que permite determinar novas dimensões para outras frequências de ressonância, de acordo com os requisitos da aplicação.

Palavras-chave: DGS, matrioska, miniaturização, seletividade, ressonador dielétrico.

ABSTRACT

This research proposes the miniaturization of a filter based on a defected ground structure, DGS, based on the matryoshka geometry, using a dielectric resonator, DR. The initial design equations are presented and the variation in frequency response when changing the positioning and dimensions of the DR is discussed. To verify the expected characteristics (miniaturization, selectivity and tuning of the resonance frequency), four DGS-matryoshka filters with different dimensions were manufactured and characterized, using a high permittivity ceramic (MCT-115, $\epsilon_r = 115$) as the DR. Without using the DR, varying the dimensions of the DGS-matryoshka resulted in changes in the resonance frequency and bandwidth. In this case, it was observed that with the smallest dimension of the DGS, higher values were obtained for both the resonance frequency and the bandwidth. When the DR is used in the DGS-matryoshka, there is a reduction in the resonance frequency and bandwidth, this reduction being more significant with the DR located at the corner of the DGSs. Analysis of the current density revealed that this more significant reduction when the DR is positioned at the corner is because, in this position, the DR interacts more intensely with the field. The resonance frequency of the DGSs varied from 3.84 GHz to 0.75 GHz, representing a reduction of up to 80% with the application of the DR. The bandwidth varied from 1.02 GHz to 0.06 GHz, representing a reduction of up to 94% with the application of DR. The numerical and experimental results obtained were in good agreement, and the initial design equations proved to be viable, allowing new dimensions to be determined for other resonance frequencies, according to the requirements of the application.

Keywords: DGS, matryoshka, miniaturization, selectivity, dielectric resonator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo do uso do filtro rejeita-faixa para suprimir um sinal indesejado	17
Figura 2 - Bonecas matrioskas [31].	18
Figura 3 - Exemplo da geometria matrioska e sua expansão.	19
Figura 4 - Exemplo de filtro DGS-matrioska	20
Figura 5 - Filtro DGS-matrioska com inserção do ressonador dielétrico de alta permissividade elétrica no plano de terra	20
Figura 6 - Exemplos de elementos passivos.	22
Figura 7 - Exemplos de componentes ativos.	23
Figura 8 - Princípio de funcionamento de um filtro digital [44].	24
Figura 9 - Filtro com componentes concentrados [46].	24
Figura 10 - Filtro com componente distribuído [47].	25
Figura 11 - Estrutura geral de uma linha de microfita [13].	25
Figura 12 - Diferentes configurações de ressonadores [13].	26
Figura 13 - Geometria matrioska passo a passo.	27
Figura 14 - Geometria matrioska com dois anéis concêntricos	28
Figura 15 - Geometria matrioska com três anéis concêntricos	28
Figura 16 - Geometria matrioska aberta	29
Figura 17 - Exemplo de estrutura DGS com geometria matrioska.....	30
Figura 18 - Geometrias DGS: (a) <i>spiral head</i> , (b) <i>arrowhead-slot</i> , (c) " <i>H</i> " <i>shape slots</i> , (d) <i>a square open-loop with in middle section</i> , (e) <i>open-loop dumbbell</i> e (f) <i>interdigital DGS</i> [19].	31
Figura 19 - Resposta em frequência típica de um ressonador com dois ou mais anéis concêntricos [16].	34
Figura 20 - Geometria do filtro DGS incluindo a posição do ressonador dielétrico	35
Figura 21 - Configuração utilizada para a caracterização experimental.	37
Figura 22 - DGS 1 a 4 fabricados (vista inferior).....	37
Figura 23 - Resposta em frequência da DGS1 matrioska e miniaturas do filtro DGS-matrioska	38
Figura 24 - Resposta em frequência da DGS2 matrioska e miniaturas do filtro DGS-matrioska	40
Figura 25 - Resposta em frequência da DGS3 matrioska e miniaturas do filtro DGS-matrioska	42
Figura 26 - Resposta em frequência da DGS4 matrioska e miniaturas do filtro DGS-matrioska	44
Figura 27 - Frequências de Ressonância para diferentes posições do DR (DGS3).....	47
Figura 28 - Frequências de Ressonância para diferentes posições do DR (DGS3) (Vista Superior).....	48
Figura 29 - Dimensões do DR.	49
Figura 30 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 5 \text{ mm}$	50
Figura 31 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 5 \text{ mm}$	50

Figura 32 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 3 \text{ mm}$.	52
Figura 33 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 3 \text{ mm}$.	52
Figura 34 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 1 \text{ mm}$.	54
Figura 35 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 1 \text{ mm}$.	54
Figura 36 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR no centro, $a = 3 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ e c variando.	56
Figura 37 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR na quina, $a = 3 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ e c variando.	56
Figura 38 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 5 \text{ mm}$.	58
Figura 39 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 5 \text{ mm}$.	58
Figura 40 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 3 \text{ mm}$.	60
Figura 41 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 3 \text{ mm}$.	60
Figura 42 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 1 \text{ mm}$.	62
Figura 43 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 1 \text{ mm}$.	62
Figura 44 - Resposta em frequência da DGS3 com DR no centro, $a = 3 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ e c variando.	64
Figura 45 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR na quina, $a = 3 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ e c variando.	64
Figura 46 - Densidade de corrente da DGS1 sem DR.	67
Figura 47 - Densidade de corrente da DGS1 com DR no centro.	67
Figura 48 - Densidade de corrente da DGS1 com DR na quina.	68
Figura 49 - Densidade de corrente da DGS4 sem DR.	68
Figura 50 - Densidade de corrente da DGS4 com DR no centro.	69
Figura 51 - Densidade de corrente da DGS4 com DR na quina.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões da DGS matrioska.....	35
Tabela 2 - Resumo dos resultados obtidos para a DGS1.....	39
Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos para a DGS2.....	41
Tabela 4 - Resumo dos resultados obtidos para a DGS3.....	43
Tabela 5 - Resumo dos resultados obtidos para a DGS4.....	45
Tabela 6 - Frequência de ressonância da DGS matrioska sem DR.	45
Tabela 7 - Frequência de ressonância da DGS matrioska com DR no centro.....	46
Tabela 8 - Frequência de ressonância da DGS matrioska na quina.....	46
Tabela 9 - Largura de banda da DGS matrioska sem o DR.	46
Tabela 10 - Largura de banda da DGS matrioska com DR no centro.	46
Tabela 11 - Largura de banda da DGS matrioska com DR na quina.	47
Tabela 12 - Resumo dos resultados obtidos para DGS1 com $c = 5 \text{ mm}$	51
Tabela 13 - Resumo dos resultados obtidos para DGS1 com $c = 3 \text{ mm}$	53
Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos para DGS1 com $c = 1 \text{ mm}$	55
Tabela 15 - Resumo dos resultados obtidos para DGS1 com $a = 3 \text{ mm}$ e $b = 3 \text{ mm}$	57
Tabela 16 - Resumo dos resultados obtidos para DGS3 com $c = 5 \text{ mm}$	59
Tabela 17 - Resumo dos resultados obtidos para DGS3 com $c = 3 \text{ mm}$	61
Tabela 18 - Resumo dos resultados obtidos para DGS3 com $c = 1 \text{ mm}$	63
Tabela 19 - Resumo dos resultados obtidos para DGS3 com $a = 3 \text{ mm}$ e $b = 3 \text{ mm}$	65

LISTA DE SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
PDDF	Plano de Atribuição, Destinação, e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
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>
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i>
PBG	<i>Photonic Band Gap</i>
EBG	<i>Electromagnetic Band Gap</i>
AL	Atenuação Livre
BW	<i>Band Width</i>

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 concêntrico da geometria matrioska
w_{ma2}	Dimensão do segundo anel concêntrico da geometria matrioska
w_{ma3}	Dimensão do terceiro anel concêntrico da geometria matrioska
g	<i>gap</i> , fenda
f_{c1}	Primeira frequência de corte
f_{c2}	Segunda frequência de corte
f_{r1}	Primeira frequência de ressonância
f_{r2}	Segunda frequência de ressonância
$f_{r\text{média}}$	Frequência de ressonância central
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
w	Largura da microfita
L	Distância entre as portas 1 e 2
$ S_{11} $	Módulo do coeficiente de reflexão
$ S_{21} $	Módulo do coeficiente de transmissão
h	Espessura do substrato
t_f	Coefficiente de temperatura na frequência de ressonância

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Contextualização	16
1.2. Objetivos.....	20
1.2.1. Objetivo Geral	20
1.2.2. Objetivos Específicos	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1. Geometria Matrioska	27
2.2. Estruturas DGS	29
2.3. Ressonador Dielétrico.....	31
2.3.1. Frequência de Ressonância (f_r).....	33
2.3.2. Constante Dielétrica (ϵ_r)	33
2.3.3. Fator de Qualidade (Q)	33
2.3.4. Coeficiente de Temperatura na Frequência de Ressonância (t_f)	33
2.4. Parâmetros de Análise dos Filtros	34
3. RESULTADOS OBTIDOS.....	35
3.1. Filtro DGS-Matrioska variando posição do DR: resultados numéricos e experimentais	36
3.2. Filtro DGS-Matrioska variando dimensões do DR: resultados numéricos	48
3.2.1. DGS1 ($W_{ma1} = 12,0\text{ mm}$) com dimensões variando	50
3.2.2. DGS3 ($W_{ma1} = 15,5\text{ mm}$) com dimensões variando	58
3.3. Análise da Densidade de Corrente dos filtros DGS-matrioska	66
3.3.1. Densidade de corrente da DGS1	67
3.3.2. Densidade de corrente da DGS4.....	68
4. CONCLUSÃO	70
4.1. Considerações finais	70
4.2. Sugestões e continuidade dos trabalhos.....	71
TRABALHOS PUBLICADOS	72
REFERÊNCIAS.....	73

1. INTRODUÇÃO

Esta introdução está dividida em duas seções. Na primeira seção é apresentada uma contextualização e, em seguida, são apresentados os objetivos desta dissertação. Concluindo este Capítulo, é descrita a organização desta dissertação.

1.1. Contextualização

No advento da radiocomunicação, a comunicação obteve um avanço considerável, pois graças ao domínio dessa tecnologia, o estabelecimento da comunicação tornou-se possível e se deu através do espaço livre e em tempo real, podendo ser realizado por meio de códigos, textos, voz, imagens ou vídeos, passando a existir, dessa forma, a comunicação como conhecemos hoje [1]-[3].

Nos dias de hoje, sem dúvidas, mobilidade é a palavra-chave nas telecomunicações. Desta maneira, os *smartphones* e suas variadas aplicações fazem parte da vida de mais de seis bilhões de usuários em todo o mundo, em 2023 [4]. Além disso, o uso dos sistemas de comunicações móveis se faz presente em diversos equipamentos, por exemplo: tablets, notebooks, drones, controles de acesso, entre outros que compõem a Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT) [1], [5]-[7].

A crescente necessidade de utilização de serviços móveis integrados, trouxe alguns obstáculos no âmbito da mobilidade para a convergência digital. Entre esses obstáculos está a restrição de utilização dos espaços destinados às estações de telecomunicações e suas antenas, assim como a limitação do próprio espectro de radiofrequência. Uma das alternativas para mitigar a restrição da utilização dos espaços destinados às estações de telecomunicações é o compartilhamento da infraestrutura de diversas tecnologias. Já para minimizar as limitações relacionadas ao espectro da radiofrequência, que podem causar deteriorações indesejadas na qualidade da informação, faz-se necessário uma alocação assertiva da faixa de frequência, tendo em vista que este é um recurso escasso e limitado [8]-[10].

Por esse motivo, a utilização das faixas de frequências disponíveis deve ser feita da forma mais apropriada possível, sendo, no Brasil, regulamentada pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), por meio do Plano de Atribuição, Destinação, e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil (PDFF) [11], [12], em conformidade com tratados e acordos internacionais celebrados juntos à União Internacional de Telecomunicações, do inglês *International Telecommunication Union* (ITU) [8].

Considerando que muitos dos atuais equipamentos que utilizam as telecomunicações operam em mais de uma faixa de frequência, como, por exemplo, os *smartphones*, assim como a proximidade de diversas antenas em um mesmo espaço de uma estação de telecomunicações, existe a preocupação em minimizar interferências que possam degradar a qualidade dos serviços, requerendo o desenvolvimento de novas configurações de filtros.

Neste contexto, pesquisadores, com o intuito de minimizar os efeitos destrutivos causados pelas interferências, buscam desenvolver novos filtros, que atendam aos requisitos de resposta em frequência e ainda apresentem baixo custo, sejam leves e compactos [13], [14]. A Figura 1 ilustra o uso de um filtro rejeita-faixa, rejeitando um sinal indesejado.

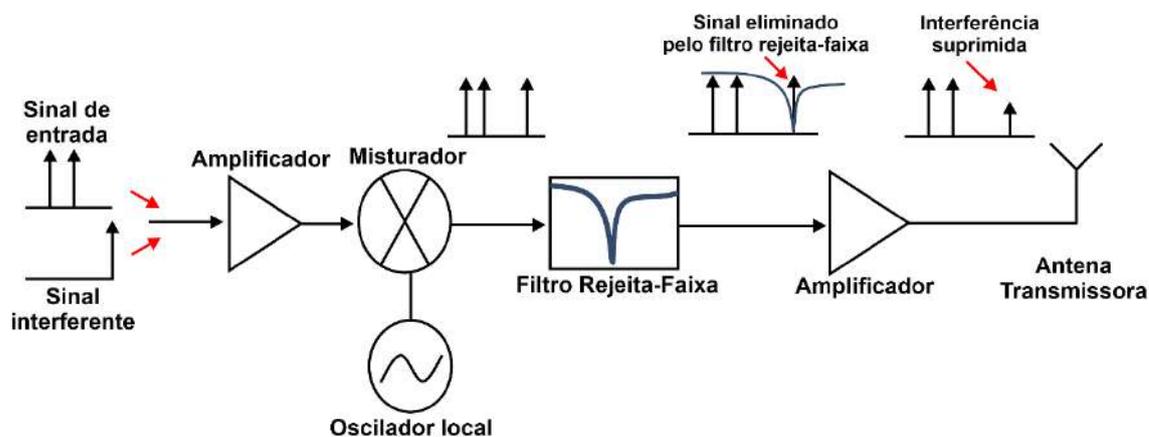


Figura 1 - Exemplo do uso do filtro rejeita-faixa para suprimir um sinal indesejado.

Fonte: Autor.

O crescente número de aplicações dos sistemas de telecomunicação exige parâmetros cada vez mais delimitados nas faixas de frequência utilizadas, além dos desafios que estão relacionados a parâmetros como custo, miniaturização, processo fabril, entre outros, os quais impulsionam o desenvolvimento de novos dispositivos que atendam às necessidades do mercado.

Diante disso, os projetos de filtros recebem bastante atenção nas pesquisas acadêmicas e nas indústrias, apesar de ser uma das tecnologias mais consolidadas na área das telecomunicações. Para aplicações em micro-ondas, especialmente para aplicações em sistemas de comunicações móveis, os filtros planares recebem uma especial atenção [13]-[15]. Nesse contexto, o Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA), do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), realiza pesquisas de filtros planares com novas geometrias.

Entre os filtros pesquisados pode-se citar os filtros baseados na geometria matrioska [15]-[17] e, mais recentemente, filtros utilizando estruturas com defeito no plano terra, DGS, do inglês *Defected Ground Structures*, baseados na geometria matrioska, ou simplesmente DGS-matrioska [18].

As DGS são estruturas versáteis, possuindo várias aplicações, sendo bastante pesquisadas [19], [20]. Alguns exemplos dessas aplicações são os filtros [21], [22], as antenas [23], [24], os divisores de potência [25], [26], os sensores [27], [28], e transmissão de energia sem fio [29], [30].

Uma DGS consiste em uma modificação feita no plano terra de uma linha de transmissão planar, que pode ser do tipo microfita, linhas acopladas, linhas coplanares, dentre outras. Essa modificação é produzida por meio da remoção de uma parte da camada de metal do plano terra, alterando as características da linha de transmissão, de acordo com a resposta em frequência requerida para a aplicação [19], [20].

A geometria proposta para a DGS deste trabalho foi baseada nas bonecas russas, chamadas de matrioskas, as quais podem ser observadas na Figura 2. Essas bonecas possuem unidades no seu interior, ou seja, a mesma boneca é organizada uma dentro das outras, mudando apenas o seu tamanho, portanto, ocupando apenas o volume da maior boneca [31].



Figura 2 - Bonecas matrioskas [31].

Nas aplicações em telecomunicações, em estruturas planares, a geometria matrioska é composta por anéis concêntricos, interligados e inseridos uns dentro dos outros, limitando assim, sua área de ocupação ao elemento mais externo [32], [33]. Um exemplo dessa geometria matrioska pode ser observado na Figura 3.

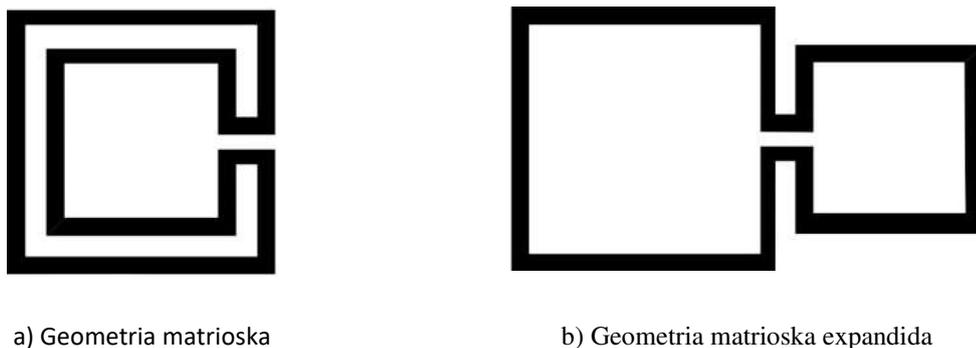


Figura 3 - Exemplo da geometria matrioska e sua expansão.

Fonte: Autor.

As principais características que os filtros baseados na geometria matrioska apresentam são a redução considerável da frequência de ressonância e a rápida transição de faixa de passagem para a faixa de rejeição. Isso se deve ao fato de que nas configurações baseadas na geometria matrioska, os anéis internos estão interligados, formando um único elemento, aumentando o seu comprimento efetivo [15]-[17].

Em [18] e [34], foi introduzido o filtro DGS baseado na geometria matrioska, Figura 4. E nestas aplicações foram verificadas características de miniaturização e rápida transição da banda passante para banda de rejeição para este tipo de filtro. Nesta dissertação, procurando otimizar os resultados encontrados nas aplicações citadas acima, é apresentado o desenvolvimento de filtros DGS-matrioska compactos, utilizando ressonador dielétrico, Figura 5. Entre as características otimizadas, destacam-se a seletividade e a miniaturização.

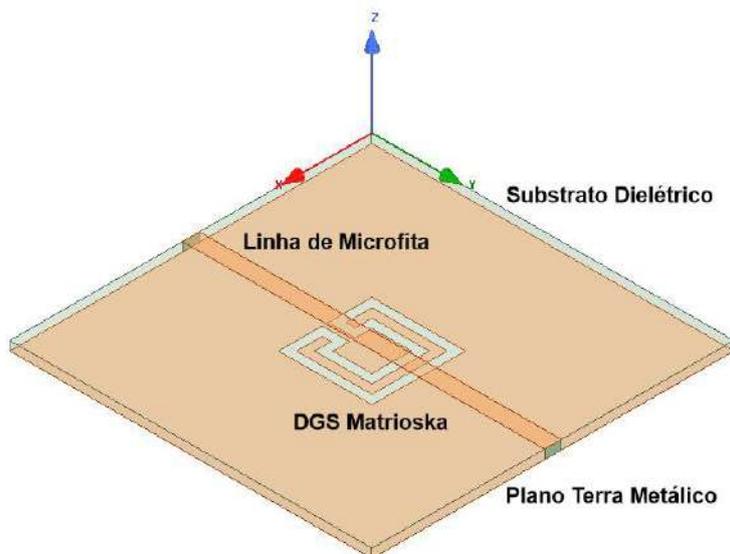


Figura 4 - Exemplo de filtro DGS-matroska.
Fonte: Autor.

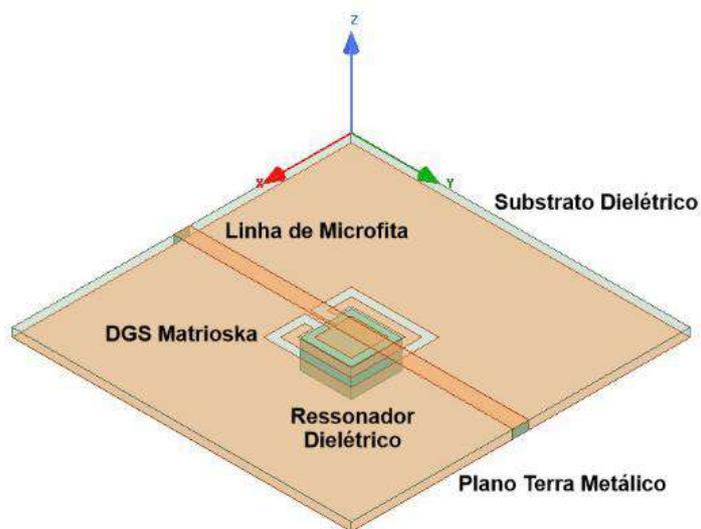


Figura 5 - Filtro DGS-matroska com inserção do ressonador dielétrico de alta permissividade elétrica no plano de terra.
Fonte: Autor.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo geral desenvolver filtros DGS-matroska compactos utilizando ressonador dielétrico.

1.2.2. 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;
- ✓ Assimilar os princípios da geometria matrioska e as características básicas dos ressonadores dielétricos;
- ✓ Assimilar os princípios dos filtros DGS, enfatizando os filtros DGS-matrioska;
- ✓ Avaliar o efeito da utilização do ressonador dielétrico nos filtros DGS-matrioska;
- ✓ Projetar e caracterizar numericamente filtros DGS-matrioska e o seu comportamento ao se utilizar ressonador dielétrico de alta permissividade elétrica;
- ✓ Avaliar a validade das equações iniciais de projeto e a variação dos parâmetros de projeto dos filtros;
- ✓ Avaliar o efeito da localização do ressonador dielétrico de alta permissividade na resposta em frequência do filtro;
- ✓ 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 da geometria matrioska, da estrutura DGS e do ressonador dielétrico, como a geometria matrioska é obtida, as características básicas e as equações iniciais de projeto. Também serão explicados os critérios utilizados para a análise dos filtros. No Capítulo 3, serão apresentados os resultados obtidos nas simulações e nas medições e suas análises. Já no Capítulo 4, serão descritos os apontamentos obtidos a partir dos resultados encontrados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos sistemas de telecomunicações, uma das finalidades dos filtros é separar e delimitar sinais de radiofrequência que estejam em determinadas faixas de frequência do espectro eletromagnético, sendo assim possível minimizar os efeitos que são causados por interferências e ruídos. Dentre suas aplicações, destacam-se os sistemas de radiodifusão, comunicação via satélite, Wi-Fi, telefonia móvel, radares, eletrônica embarcada em automóveis, drones, entre outros, estando este dispositivo presente desde as fontes de tensão até os sistemas de áudio. O desenvolvimento dos filtros merece atenção especial nas pesquisas da área de engenharia, pelo fato destes estarem integrando desde os primeiros sistemas de telecomunicações até os mais modernos equipamentos utilizados nos dias de hoje. Por isso, os projetos de filtros devem ser realizados de acordo com a aplicação. Para isso é necessário que suas principais características sejam estudadas, resultando assim em uma maior eficiência dos sistemas em que são introduzidos [13]- [15].

Os filtros são classificados quanto à tecnologia e componentes empregados em sua construção. E podem ser classificados como analógicos ou digitais. Os filtros analógicos são estabelecidos em uma faixa de frequência, não utilizam o processamento digital de sinais e são identificados como filtros passivos e ativos [14], [15], [17].

- Filtros passivos: são projetados e construídos apenas com elementos passivos dos circuitos, que são os resistores, indutores e capacitores, Figura 6, associados em série ou em paralelo.



Figura 6 - Exemplos de elementos passivos.
Fonte: Autor.

- Filtros ativos: além dos elementos passivos, também são utilizados componentes ativos para seu projeto e construção. Destacando-se entre esses componentes, os transistores e amplificadores, Figura 7.

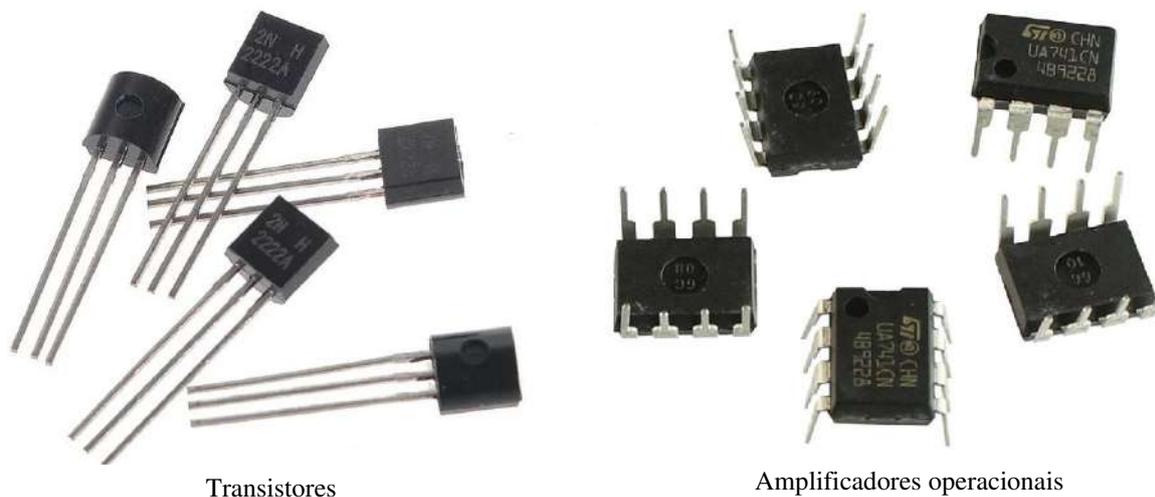


Figura 7 - Exemplos de componentes ativos.
Fonte: Autor

Já os filtros digitais são implementados por meio de dispositivos lógicos programáveis (*hardware*) e/ou *software*. E seu princípio básico de funcionamento é a conversão analógico/digital da informação (amostragem) e processamento digital, Figura 8. Este tipo de filtro, destaca-se por possuir dois pontos positivos: a flexibilização de suas características por *hardware* e/ou *software* e a possibilidade de se construir dispositivos com ordens muito altas, ou seja, alta seletividade, a depender do número de bits empregados [15], [17].

Tendo em vista que, os filtros digitais possuem a necessidade de conversores analógico/digital (A/D) no lado do transmissor e digital/analógico (D/A) no lado do receptor, dependendo da aplicação, o aumento do número de bits pode elevar a complexidade do *hardware* e resultar em maiores custos. Outro fator limitante dos filtros digitais é a faixa de frequência de operação [43].

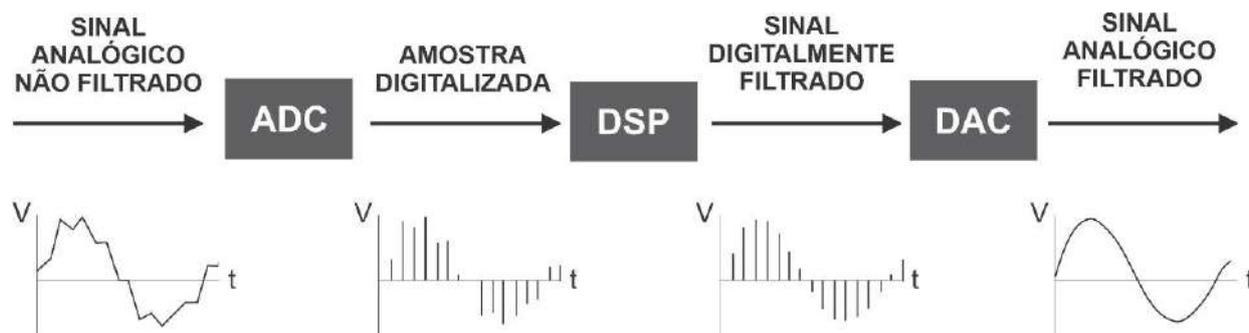


Figura 8 - Princípio de funcionamento de um filtro digital [44].

Além disso, existe outra classificação dos filtros, a qual é baseada em suas dimensões em relação ao menor comprimento de onda guiada de operação, ou seja, em relação à maior frequência de operação. Diante disso, os filtros podem ser construídos por elementos distribuídos ou concentrados, alguns autores adotam uma terminologia de componentes semiconcentrados ou quase concentrados. As definições de filtros com componentes distribuídos e concentrados serão expostas em seguida, porém, não podem ser adotadas com rigidez, em virtude de que os casos limites são analisados de acordo com suas características particulares. As definições são [13], [42], [45]:

- Filtros com componentes concentrados (*lumped*) são constituídos por componentes (resistores, indutores, capacitores, linhas de transmissão etc.) dos quais as dimensões máximas dos componentes são muito menores que o menor comprimento de onda guiado, Figura 9. Uma aproximação adotada é $l_{máx.} < \lambda/20$. Neste caso, são aplicáveis as leis de Kirchhoff das Tensões e das Correntes e a lei de Ohm.



Figura 9 - Filtro com componentes concentrados [46].

- Filtros com componentes distribuídos são constituídos por componentes dos quais as dimensões dos componentes são da ordem de grandeza do menor comprimento de onda guiado, Figura 10. Neste caso, a análise desses circuitos é realizada utilizando as equações de Maxwell.

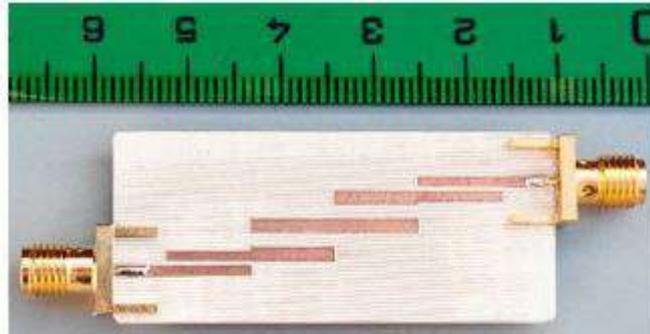


Figura 10 - Filtro com componente distribuído [47].

Para as aplicações de micro-ondas, busca-se filtros que apresentem baixo custo, tamanho e peso reduzidos, especialmente para dispositivos móveis [14]. Diante disso, as estruturas fabricadas usando tecnologias de circuito impresso são as mais escolhidas. Essas estruturas são, de forma geral, filtros com componentes concentrados ou semiconcentrados, na forma planar. Uma estrutura planar possui uma de suas dimensões muito menor que o comprimento de onda guiado, sendo essa dimensão, comumente, a espessura do substrato dielétrico [17].

Os filtros de micro-ondas, operam em altas frequências e reduzidos valores de comprimento de onda. Dentre os filtros de micro-ondas, é possível destacar os filtros construídos com linhas de transmissão planares, incluindo os de microfita, a qual é constituída por uma fita condutora uniforme, disposta sobre um substrato dielétrico, limitada por um plano de terra [13], [15], Figura 11.

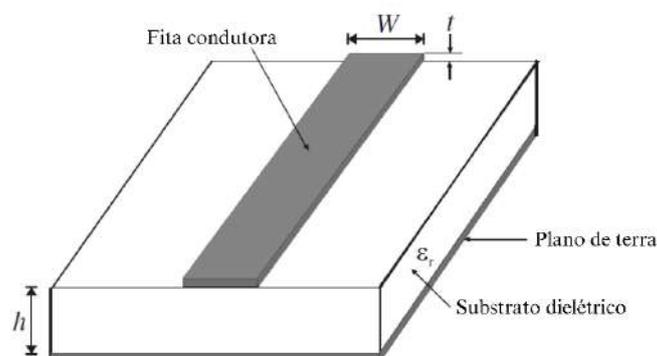


Figura 11 - Estrutura geral de uma linha de microfita [13].

Na construção dos filtros planares são utilizados ressonadores, que são estruturas que ressoam em frequências bem definidas. Existem ressonadores de microfita de inúmeras formas. Em geral, para projetos de filtros os ressonadores de microfita podem ser classificados como ressonadores de elementos concentrados, ou elementos semiconcentrados, e ressonadores de linha distribuída ou *patch* [13]. A escolha da configuração depende do tipo de filtro desejado, da técnica de fabricação, das perdas aceitáveis, bem como da frequência de operação. Na Figura 12, é possível observar algumas configurações típicas desses ressonadores.

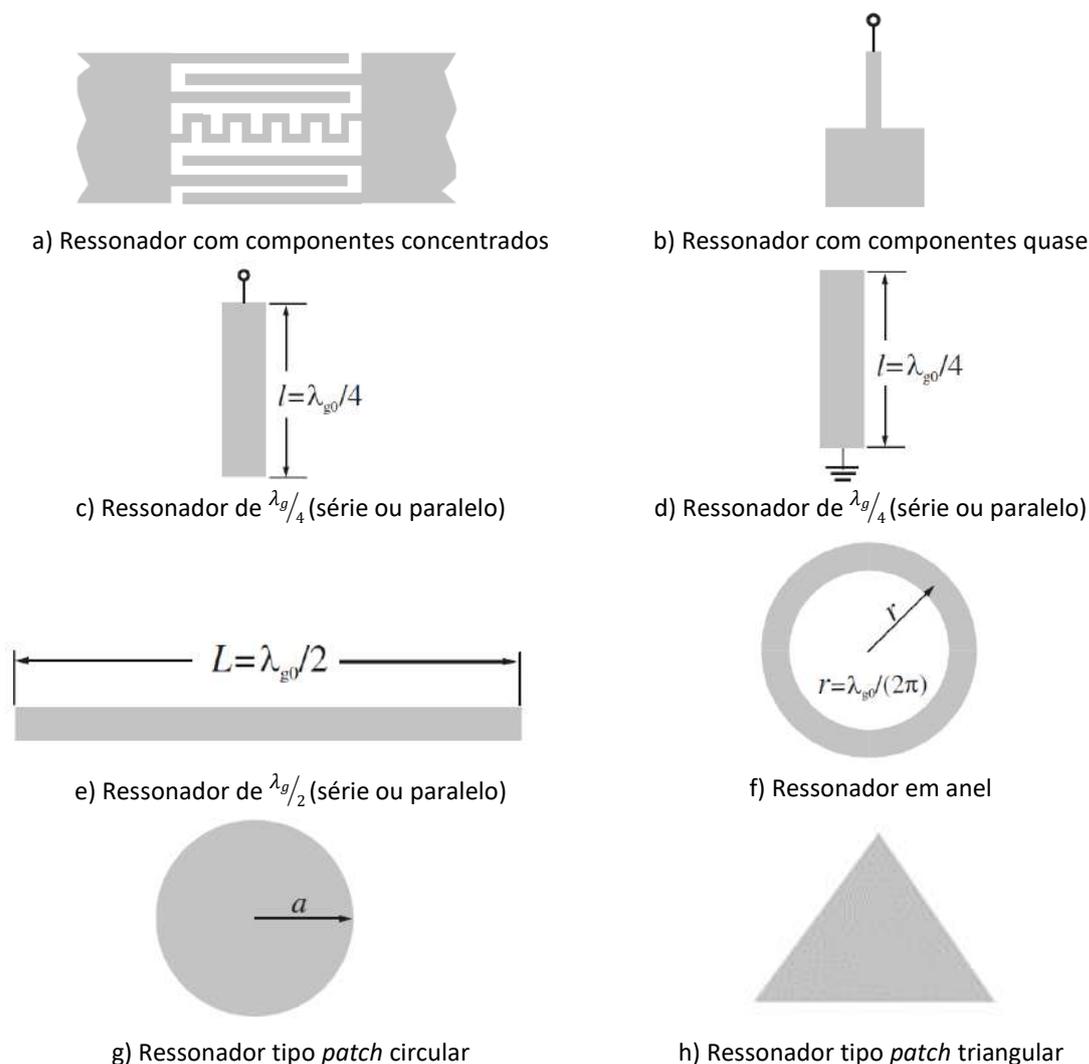


Figura 12 - Diferentes configurações de ressonadores [13].

Destacando de forma particular, o ressonador de anel mostrado na Figura 16(f), por meio do qual é possível construir diferentes configurações, como espiras quadradas. A geometria matrioska aplicada neste trabalho, por exemplo, pode ser considerada um ressonador do tipo anel.

Nesta dissertação, os ressonadores foram construídos a partir de linhas de microfita, ou seja, foi desenvolvido um filtro planar compacto com componentes distribuídos, usando uma DGS baseada na geometria matrioska, combinada com ressonador dielétrico.

2.1. Geometria Matrioska

A geometria matrioska foi introduzida em [32], [33], sendo inicialmente aplicada em superfícies seletivas em frequência, FSS, em que foi possível observar uma considerável redução na frequência de ressonância, além de uma resposta em frequência multibanda. Posteriormente, foram desenvolvidos filtros utilizando a geometria matrioska. Nesse caso, além da redução da frequência de ressonância, foi possível observar uma rápida transição da banda passante para a banda de rejeição, tornando o filtro muito mais seletivo [15]-[17].

A variação do número de anéis, a utilização de anéis abertos ou fechados, as dimensões dos anéis e o espaçamento entre eles, são alguns dos recursos que são utilizados para obter uma resposta em frequência específica nos filtros que utilizam a geometria matrioska. No entanto, a área ocupada pelo anel mais externo permanece a mesma. Porém, é importante mencionar que com o aumento do número de anéis, devido ao acoplamento que ocorre entre os anéis, torna-se mais difícil prever o comportamento do filtro.

A geometria matrioska é caracterizada pela continuidade dos anéis concêntricos, como será exemplificado a seguir para dois anéis concêntricos. Inicialmente, são projetados dois anéis concêntricos, Figura 13(a). Em seguida uma fenda é inserida em ambos os anéis na mesma região, Figura 13(b). Finalmente, os dois anéis são interligados a geometria matrioska, Figura 13(c). Se são considerados um maior número de anéis, um novo anel concêntrico é inserido e o processo se repete.

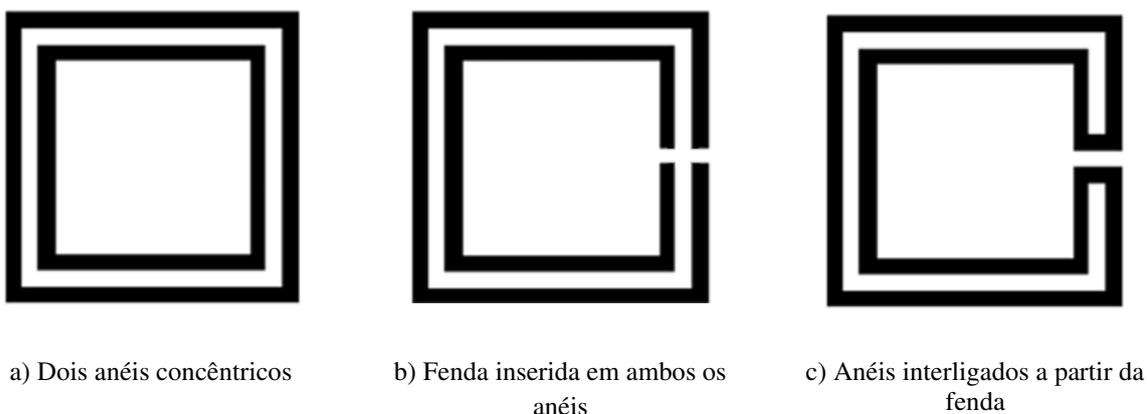
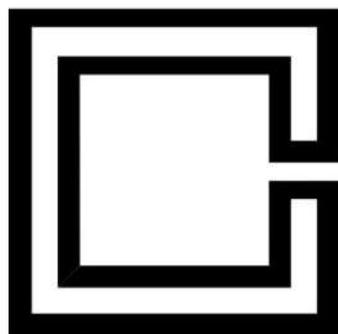
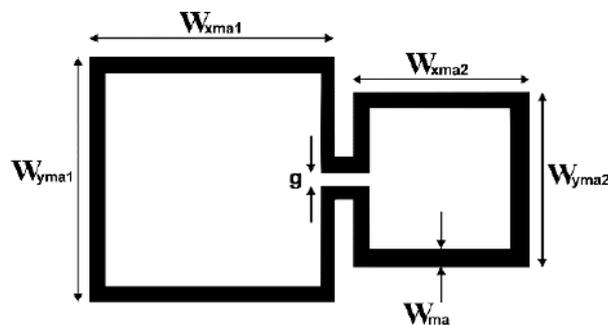


Figura 13 - Geometria matrioska passo a passo.
Fonte: Autor.

As Figuras 14 e 15 apresentam a geometria matrioska com dois e três anéis concêntricos, respectivamente.



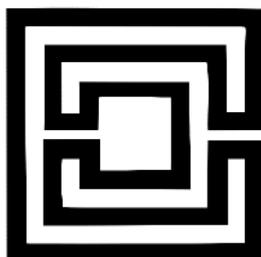
a) Geometria matrioska com dois anéis



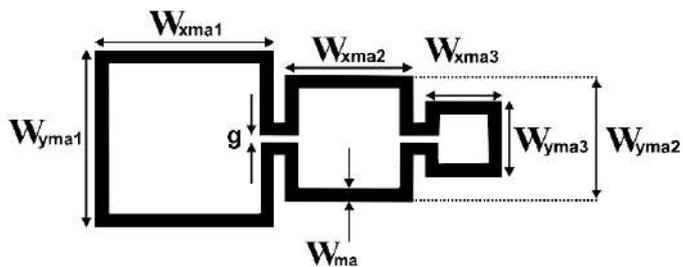
b) Geometria matrioska com dois anéis expandida

Figura 14 - Geometria matrioska com dois anéis concêntricos.

Fonte: Autor.



a) Geometria matrioska com três anéis



b) Geometria matrioska com três anéis expandida

Figura 15 - Geometria matrioska com três anéis concêntricos.

Fonte: Autor.

Para anéis quadrados, $w_{xmai} = w_{ymai} = w_{mai}$, com $i = 1, 2$, para dois anéis concêntricos, e $i = 1, 2, 3$, para três anéis concêntricos. Para a geometria matrioska com dois anéis concêntricos, uma aproximação inicial da frequência de ressonância, pode ser obtida a partir de:

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

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

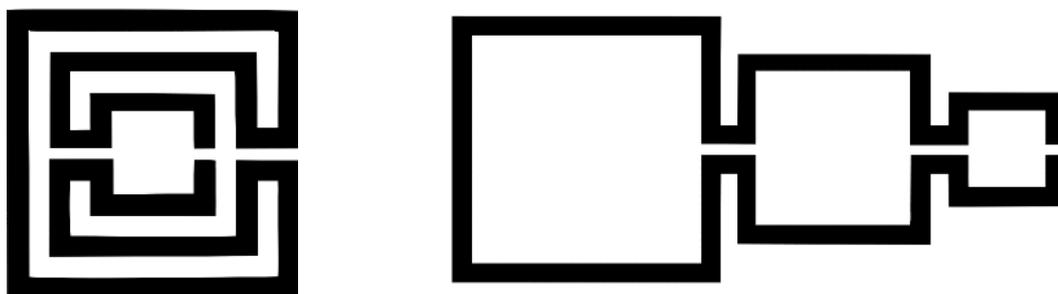
$$w_{mai-avg} = w_{mai} - w_{ma}, \quad i = 1,2. \quad (3)$$

Em que ε_{reff} é a permissividade elétrica relativa para a linha de microfita com um substrato de constante dielétrica ε_r , espessura h e largura w_{ma} . Vale salientar que as equações (1)-(3) são equações iniciais de projeto, ou seja, são um passo inicial para uma posterior otimização numérica. Destaque-se ainda que, na frequência de ressonância, o L_{eff} corresponde à aproximadamente um comprimento de onda guiado.

Para o caso de estruturas com três anéis concêntricos, a Equação (1) permanece válida, no entanto na Equação (2), o L_{eff} passa a ser calculado por:

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

A quantidade de anéis e suas características, como a largura das fitas (w_{ma}), ou o gap (g), podem variar de acordo com a técnica de fabricação utilizada e a necessidade de miniaturização. Além disso, a geometria matrioska possui a variação do anel matrioska aberto, Figura 16, reduzindo a frequência de ressonância para aproximadamente metade do valor do anel matrioska anterior [34].



a) Geometria matrioska aberta com três anéis concêntricos b) Geometria matrioska aberta com três anéis expandida

Figura 16 - Geometria matrioska aberta.
Fonte: Autor.

2.2. Estruturas DGS

A estrutura DGS é formada a partir de uma modificação feita no plano terra de uma linha de transmissão planar, Figura 17, que pode ser do tipo microfita, linhas acopladas, linhas coplanares, dentre outras. Essa modificação é produzida através da remoção de uma parte da

camada de metal do plano terra, alterando as características da linha de transmissão, de acordo com a resposta em frequência requerida para a aplicação [19], [20].

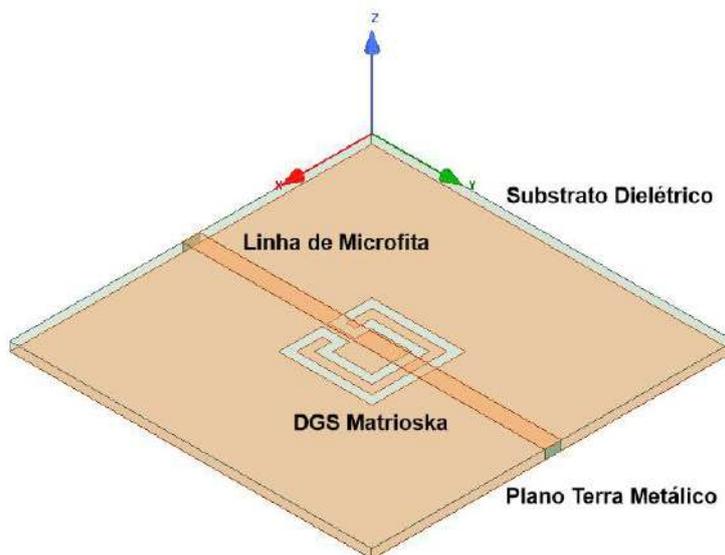


Figura 17 - Exemplo de estrutura DGS com geometria matrioska.
Fonte: Autor.

Inicialmente, a DGS foi aplicada em filtros, possuindo como elemento básico uma fenda ou ranhura ressonante na camada de metalização do plano terra, a qual era posicionada e alinhada diretamente abaixo de uma linha de microfita, para um acoplamento eficiente à linha, alcançando dessa forma uma resposta em frequência do tipo rejeita-faixa, suprimindo harmônicos de modos de ordem superior [19], [20].

A DGS possui diversas geometrias, dentre as quais podem ser citadas a geometria halteres (*dumbbell*), cabeça em espiral (*spiral head*), ranhura de ponta de flecha (*arrowhead-slot*), ranhura em forma de “H” (*“H” shape slots*), um quadrado em circuito aberto com uma ranhura na seção central (*a square open-loop with a slot in middle section*), halteres de circuito aberto (do inglês *open-loop dumbbell*), etc. Na Figura 19 é possível observar algumas das geometrias acima citadas.

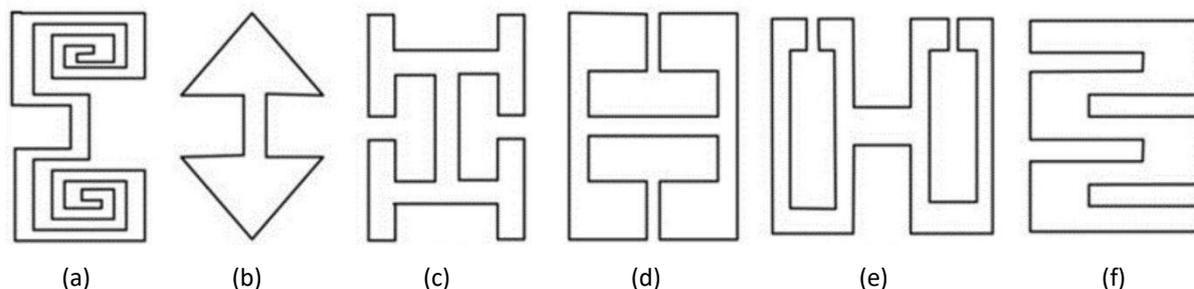


Figura 18 - Geometrias DGS: (a) *spiral head*, (b) *arrowhead-slot*, (c) *"H" shape slots*, (d) *a square open-loop with slot in middle section*, (e) *open-loop dumbbell* e (f) *interdigital DGS* [19].

Na DGS baseada na geometria matrioska, essa geometria é removida do plano terra e o anel matrioska é centralizado sob a linha de microfita, como mostrado na Figura 17.

Conforme [19], [34] algumas vantagens da DGS quando comparada com outras estruturas disponíveis na literatura são:

- Área de circuito da DGS inferior à área do circuito das demais estruturas, pois a DGS não é necessariamente uma estrutura periódica. Ainda assim, com alguns elementos DGS, observam-se propriedades que se assemelham às estruturas periódicas.
- A resposta em frequência da DGS do tipo haltere pode ser comparada com a resposta do filtro passa-baixa do tipo Butterworth de um polo.
- Pelo fato de as DGSs ocuparem uma área menor do circuito, quando comparadas às estruturas PBG, apresentam o efeito de onda lenta (aumento da capacitância e da indutância efetivas), para apenas uma, ou poucas, unidades.
- Possuem maior facilidade de ser projetadas e implementadas, além de ter maior precisão com estruturas de defeitos regulares.

Em certas condições, a DGS pode apresentar uma faixa de frequência na qual não existe propagação de ondas eletromagnéticas. Isso ocorre devido às modificações causadas pela DGS na impedância de entrada e no fluxo de corrente [19], [33].

2.3. Ressonador Dielétrico

Com o grande crescimento das telecomunicações, surgiu necessidade de trabalhar com materiais que possibilitam a redução do tamanho dos equipamentos portáteis. Dessa forma, a procura por materiais e dispositivos com características dielétricas tem se intensificado para aplicação em equipamentos que possuem peso, tamanho e custo menor que os equipamentos que já estão disponíveis no mercado [35].

Os ressonadores dielétricos são materiais que podem ser definidos como um componente sólido inorgânico, que é formado com a aplicação de calor e pressão. A estrutura destes materiais, seja ela atômica, cristalina ou microestrutura é de suma importância para entender suas aplicações e propriedades [36].

Os ressonadores dielétricos possuem ligações interatômicas do tipo iônica ou covalente e em sua estrutura cristalina possuem íons eletricamente carregados (cátions/ânions), os quais são equilibrados para garantir a eletroneutralidade do material cerâmico. Devido à sua estrutura cristalina, os ressonadores apresentam propriedades tais como altos pontos de fusão e ebulição, característica de isolante térmico e elétrico, bem como alta dureza [36].

De forma geral, os ressonadores são compostos por cristais que variam em estrutura, composição, tamanho e forma. As interfaces entre os grãos são regiões com possibilidade de ocorrer mudanças estruturais, as quais, conseqüentemente, ocasionam diferenças na sua composição e nas suas propriedades elétricas [37].

Além disso, os ressonadores dielétricos são projetados para substituir as cavidades ressonantes em aplicações de micro-ondas, como por exemplo: filtros e osciladores. Sua utilização neste tipo de aplicação permite que os projetistas obtenham dispositivos mais compactos, com maior fator Q e estabilidade térmica, com baixo custo [38].

Portanto, objetivando a miniaturização de dispositivos eletrônicos nos sistemas de telecomunicações sem fio, são priorizados ressonadores dielétricos que possuem alta constante dielétrica (ϵ_r), baixas tangentes de perdas dielétricas, alto fator de qualidade (Q), que é a alta capacidade de armazenar energia com perdas mínimas, e coeficiente de temperatura na frequência de ressonância (τ_f) positivo [36], [37].

Para esta dissertação é utilizado o titanato de magnésio e cálcio, MCT [39], um dos materiais cerâmicos que não é caracterizado para aplicações em ressonadores, mas sim para substratos ou formas diversas. Suas aplicações típicas incluem substratos para antenas patch, estruturas de acoplamento para circuladores e isoladores. A série MCT apresenta constantes dielétricas que variam de 18 a 140 e neste trabalho foi utilizado o MCT-115, que possui $\epsilon_r = 115$.

Sendo um material que geralmente é dedicado a aplicações bastante específicas, é necessário que a escolha da estrutura dos ressonadores dielétricos que serão utilizados no projeto ocorra de forma inicial, a qual irá ocorrer mediante a análise de alguns parâmetros que serão apresentados a seguir, conforme [38].

2.3.1. Frequência de Ressonância (f_r)

Para caracterizar um ressonador dielétrico isolado, utiliza-se a sua frequência de ressonância, que corresponde a um mínimo de perdas dielétricas. Esta frequência é determinada principalmente pela constante dielétrica do material (ϵ_r) e pelo volume do ressonador.

2.3.2. Constante Dielétrica (ϵ_r)

A escolha do ressonador dielétrico se dá principalmente pela redução de tamanho que é proporcionada por uma constante dielétrica elevada em comparação com um filtro de cavidade de ar. Isto se dá pelo fato de que quanto mais elevada for a constante dielétrica, menor será o espaço em que os campos se concentram e menor será a dimensão a uma frequência definida.

2.3.3. Fator de Qualidade (Q)

O fator de qualidade de um ressonador dielétrico é o quociente entre a energia armazenada no ressonador e a energia dissipada no ar por ciclo. Ele define as perdas no material que são representadas por:

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (5)$$

Em que δ é o ângulo de perdas, ϵ' e ϵ'' são, respectivamente, as partes real e imaginária da constante dielétrica.

O fator Q é igual a:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg}(\delta)} = \frac{\epsilon'}{\epsilon''} \quad (6)$$

2.3.4. Coeficiente de Temperatura na Frequência de Ressonância (t_f)

O coeficiente de temperatura indica como uma propriedade física se comporta em relação a uma mudança de temperatura. De forma geral, a frequência de ressonância de um sistema de micro-ondas diminui com o aumento da temperatura. Diante disso, diz-se que este sistema tem um coeficiente de temperatura negativo.

Porém, é necessário que um sistema possua temperatura estável em toda a gama de temperaturas de funcionamento. É possível compensar esta variação de frequência com a temperatura utilizando um ressonador dielétrico com um coeficiente de temperatura positivo. O que irá evitar a redução da frequência de ressonância com o aumento da temperatura.

2.4. Parâmetros de Análise dos Filtros

Na Figura 20, é possível observar a resposta em frequência típica de um filtro baseado na geometria matrioska com dois anéis concêntricos retangulares, sendo citados alguns parâmetros, os quais serão utilizados para analisar os filtros elaborados neste trabalho.

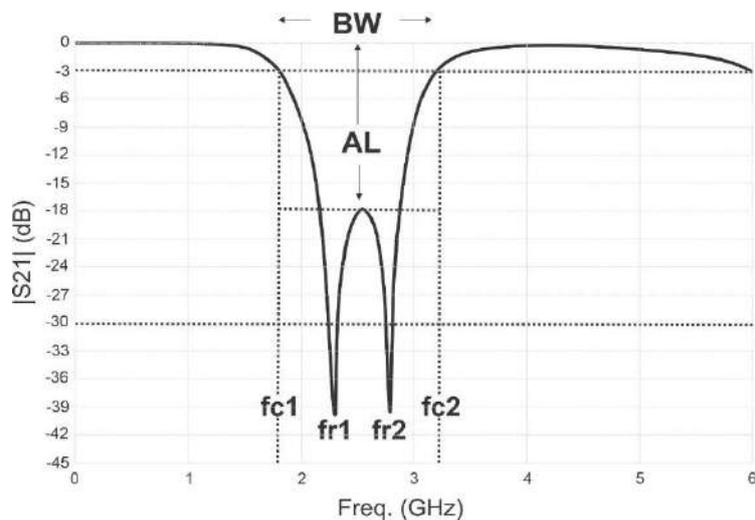


Figura 19 - Resposta em frequência típica de um ressonador com dois ou mais anéis concêntricos [16].

Parâmetros estes que são de operação e estão associados à faixa de frequência e à seletividade desejadas. Os parâmetros adotados para este trabalho são:

- Frequência de corte em -3 dB, f_{c1} e f_{c2} ;
- Frequência de ressonância, f_{r1} e f_{r2} ;
- Largura de banda de rejeição definida em -10 dB, BW ;
- Atenuação Livre, AL ;
- Região de transição de -3 dB a -30 dB.

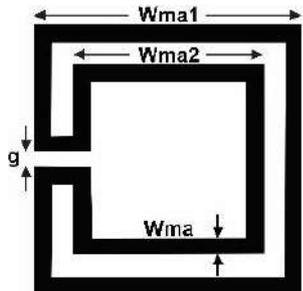
3. RESULTADOS OBTIDOS

Com o intuito de validar as características esperadas do protótipo (miniaturização, seletividade e sintonia de frequência de ressonância) e as equações de projeto iniciais propostas, foram realizadas simulações numéricas. As simulações foram realizadas no ANSYS HFSS [40], com as quais foi possível avaliar o comportamento e os parâmetros dos filtros propostos. Dentre os parâmetros destacam-se a frequência de ressonância e largura de banda.

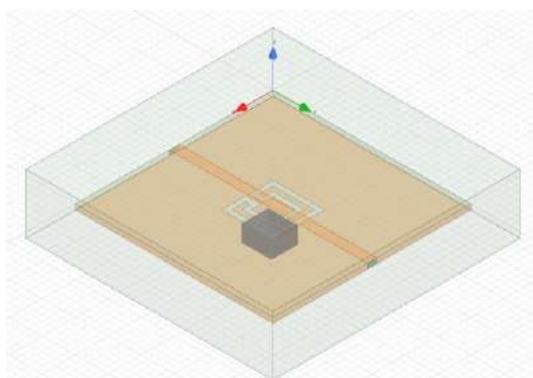
Neste trabalho, com o objetivo de analisar o comportamento da frequência de ressonância e da largura de banda em estruturas com dimensões diferentes, foram projetados quatro filtros DGS-matrioska, com substrato de fibra de vidro FR-4, em que $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $tg(\delta) = 0,02$, as dimensões totais utilizadas foram de $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 1,6 \text{ mm}$. A largura da microfita é $w = 2,8 \text{ mm}$. A Tabela 1 apresenta as dimensões da DGS matrioska.

Tabela 1 - Dimensões da DGS matrioska.

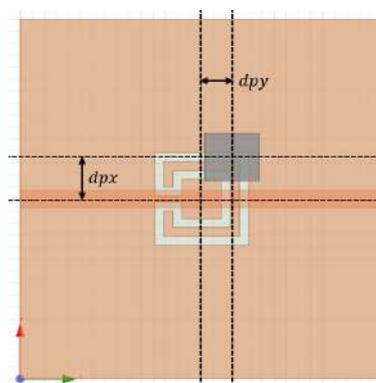
	W_{ma1}	W_{ma2}	W_{ma}	g
DGS1	12 mm	6 mm	1,5 mm	1,0 mm
DGS2	14 mm	8 mm	1,5 mm	1,0 mm
DGS3	15,5 mm	9,5 mm	1,5 mm	1,0 mm
DGS4	17 mm	11 mm	1,5 mm	1,0 mm



Como ressonador dielétrico, DR (do inglês *dielectric resonator*) foi utilizada uma cerâmica MCT-115, com dimensões $8 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$. Essa cerâmica foi colocada em diferentes posições (dpx , dpy), conforme ilustrado na Figura 20.



a) Geometria simulada



b) Posição do ressonador dielétrico

Figura 20 - Geometria do filtro DGS incluindo a posição do ressonador dielétrico.

Fonte: Autor.

3.1. Filtro DGS-Matroska variando posição do DR: resultados numéricos e experimentais

As DGSs foram simuladas no ANSYS HFSS e três situações foram consideradas: sem DR, DR no centro ($dpx = dpy = 0,0 \text{ mm}$), e quina ($dpx = 0,5 \times (w_{ma1} - 7,5)$, $dpy = 0,5 \times (w_{ma1} - 8,5)$). Em resumo, serão apresentados os resultados das seguintes estruturas:

1. DGS1 sem ressonador dielétrico;
2. DGS1 com ressonador dielétrico no centro;
3. DGS1 com ressonador dielétrico na quina;
4. DGS2 sem ressonador dielétrico;
5. DGS2 com ressonador dielétrico no centro;
6. DGS2 com ressonador dielétrico na quina;
7. DGS3 sem ressonador dielétrico;
8. DGS3 com ressonador dielétrico no centro;
9. DGS3 com ressonador dielétrico na quina;
10. DGS4 sem ressonador dielétrico;
11. DGS4 com ressonador dielétrico no centro;
12. DGS4 com ressonador dielétrico na quina;

Após as simulações, as DGSs foram fabricadas e as medições foram realizadas no Laboratório de Medidas em Telecomunicações - LMTel, do IFPB, utilizando um analisador de redes Agilent E5071C [41], Figura 21. Para cada DGS, foi obtido o parâmetro S_{21} , o qual equivale ao coeficiente de transmissão para as faixas de frequências analisadas, de 0 a 5 GHz. Na Figura 22, é possível observar os filtros fabricados (vista inferior).

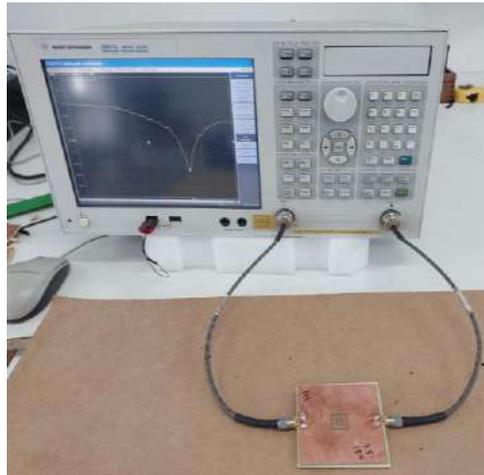


Figura 21 - Configuração utilizada para a caracterização experimental.
Fonte: Autor.

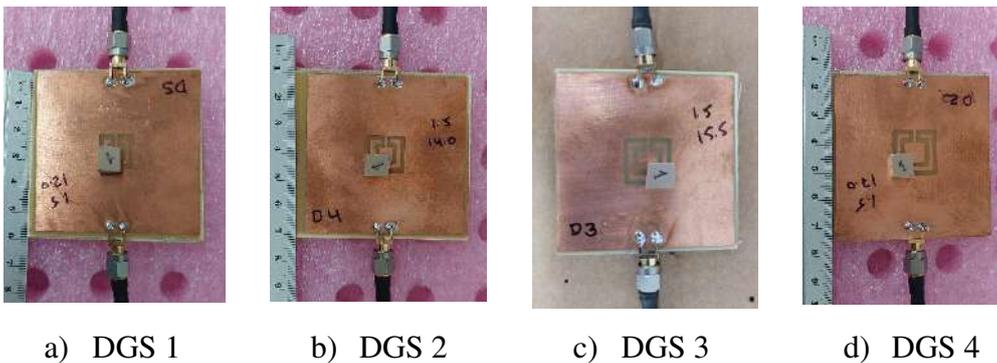


Figura 22 - DGS 1 a 4 fabricados (vista inferior).
Fonte: Autor.

Os resultados numéricos e experimentais das estruturas acima foram truncados na possível faixa de utilização dos filtros e são apresentados nas Figuras 23, 24, 25 e 26.

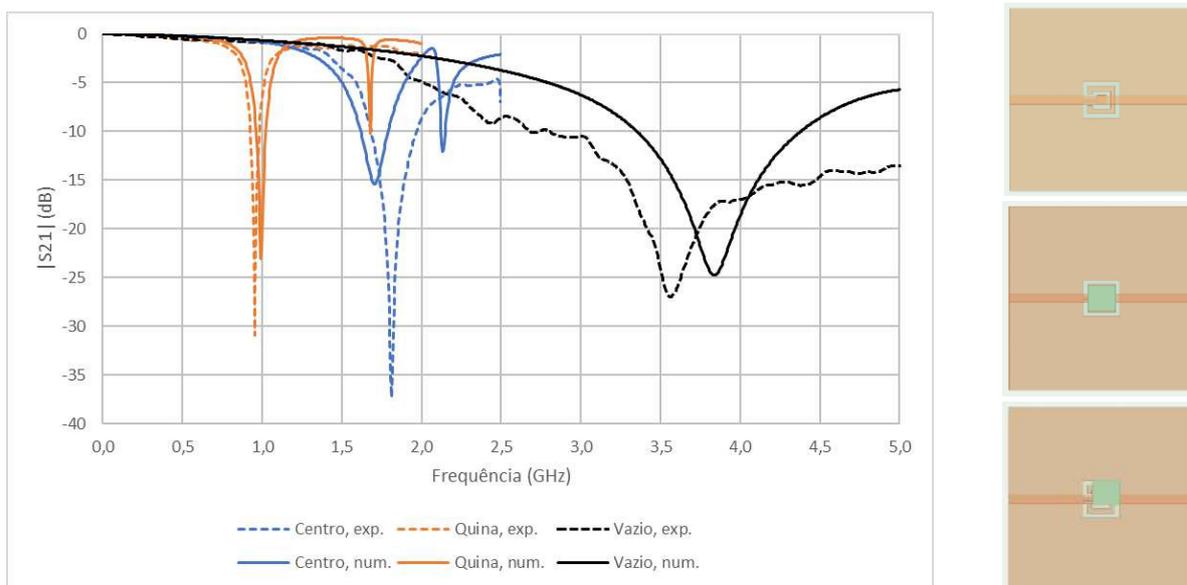


Figura 23 - Resposta em frequência da DGS1 matryoska e miniaturas do filtro DGS-matryoska.

Fonte: Autor.

Para a DGS1, Figura 23, sem o DR, a frequência de ressonância numérica foi de 3,84 GHz, e de 3,56 GHz na forma experimental. Comparando esses valores com as frequências de ressonância obtidas por meio das Equações (1)-(4), que foi de 3,64 GHz, percebe-se uma boa aproximação da frequência calculada com as frequências numéricas e experimentais. Para a DGS1 com o DR no centro, a frequência de ressonância numérica foi de 1,71 GHz e a frequência de ressonância experimental foi de 1,82 GHz. Já para a DGS1 com o DR na quina, a frequência de ressonância numérica foi 1,00 GHz e a frequência de ressonância experimental foi de 0,96 GHz.

Comparando os resultados da DGS1, tem-se que a DGS1 com o DR no centro apresenta uma redução de 55% da frequência de ressonância para o resultado numérico e uma redução de 49% da frequência de ressonância para o resultado experimental, quando comparada com o DGS1 sem o DR. Além da frequência de ressonância também verificou-se a largura de banda, calculada em -10 dB, para esse parâmetro houve uma redução de 83% na largura de banda para o resultado numérico e uma redução de 89% na largura de banda para o resultado experimental da DGS1 com o DR no centro em relação à DGS1 sem o DR.

Ainda na DGS1, observou-se que o DGS1 com o DR na quina apresenta uma redução de 74% da frequência de ressonância para o resultado numérico e uma redução de 73% da frequência de ressonância para o resultado experimental, em relação ao DGS1 sem o DR. Já para a largura de banda, calculada em -10 dB, houve uma redução de 94% na largura de banda para o resultado numérico e uma redução de 98% na largura de banda para o resultado experimental da DGS1 com o DR na quina em relação à DGS1 sem o DR.

Além disso, observa-se uma elevada divergência entre os resultados numéricos e experimentais, a qual se dá devido a fixação do DR na estrutura. Tendo em vista que o DR não foi fixado à DGS, pode surgir uma camada de ar entre o DR e a DGS no momento da medição que interfere nos resultados obtidos.

Na Tabela 2, são apresentados em resumo os dados analisados a partir da Figura 23.

Tabela 2 - Resumo dos resultados obtidos para a DGS1.

	DGS1	DGS1_{centro}	DGS1_{quina}
$(dpx \times dpy)(mm \times mm)$	–	0 × 0	2,25 × 1,75
$f_{res.num.} (GHz)$	3,84	1,71	1,00
$f_{res.exp.} (GHz)$	3,56	1,82	0,96
$f_{res.calc.} (GHz)$	3,64	–	–
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.num.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	–7,70%	5,77%	–4,17%
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.calc.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	–2,13%	–	–
$\frac{(f_{res.centro.num.} - f_{res.num.})}{f_{res.num.}} \times 100\%$	–	–55%	–
$\frac{(f_{res.centro.exp.} - f_{res.exp.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	–	–49%	–
$\frac{(f_{res.quina.num.} - f_{res.num.})}{f_{res.num.}} \times 100\%$	–	–	–74%
$\frac{(f_{res.quina.exp.} - f_{res.exp.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	–	–	73%
BW num. (– 10 dB)(GHz)	1,02	0,17	0,06
BW exp. (– 10 dB)(GHz)	2,68	0,28	0,05
$\frac{(BW_{centro.num.} - BW_{num.})}{BW_{num.}} \times 100\%$		–83%	
$\frac{(BW_{centro.exp.} - BW_{exp.})}{BW_{exp.}} \times 100\%$		–89%	
$\frac{(BW_{quina.num.} - BW_{num.})}{BW_{num.}} \times 100\%$			–94%
$\frac{(BW_{quina.exp.} - BW_{exp.})}{BW_{exp.}} \times 100\%$			–98%

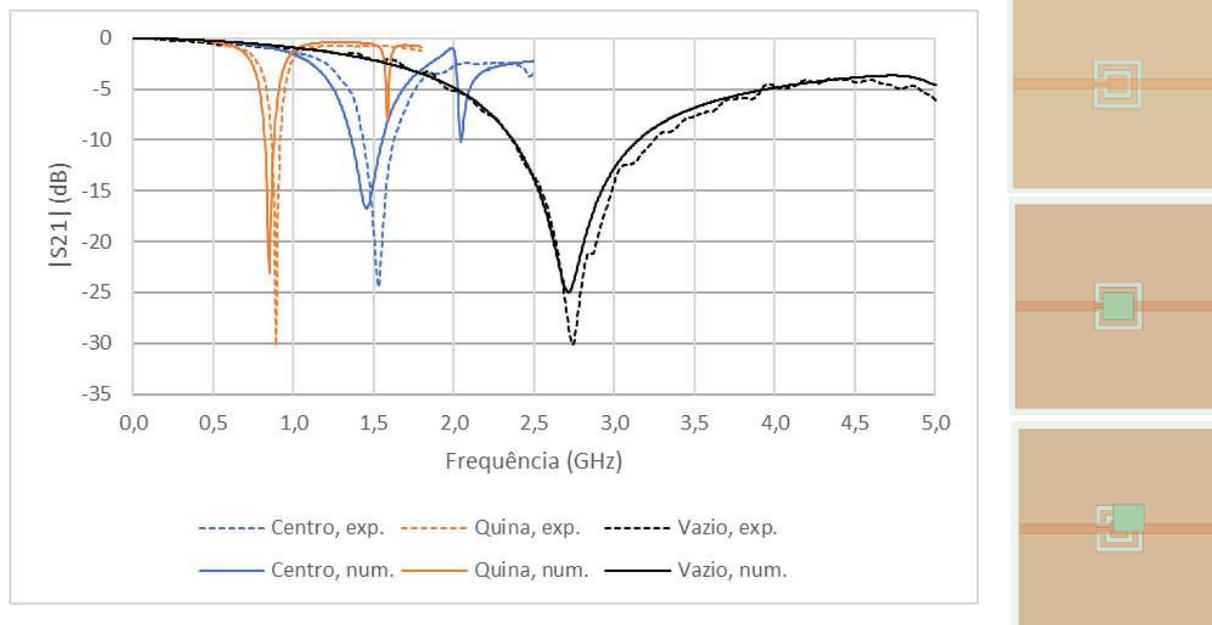


Figura 24 - Resposta em frequência da DGS2 matrioska e miniaturas do filtro DGS-matrioska.
Fonte: Autor.

Nos resultados da DGS2, Figura 24, sem o DR, a frequência de ressonância foi de 2,71 GHz de forma numérica e de 2,74 GHz de forma experimental, foram valores bastante próximos entre si e menores que os valores obtidos para a mesma situação na DGS1. Comparando às frequências de ressonância obtidas de forma numérica e experimental com a frequência de ressonância obtida através das Equações (1)-(4), que foi de 2,87 GHz, percebe-se uma boa aproximação da frequência calculada com as frequências numéricas e experimentais. Para a DGS2 com o DR no centro, a frequência de ressonância numérica foi de 1,46 GHz e a frequência de ressonância experimental foi de 1,53 GHz. Já para a DGS2 com o DR na quina, a frequência de ressonância numérica foi 0,86 GHz e a frequência de ressonância experimental foi de 0,90 GHz.

Comparando os resultados da DGS2, tem-se que o DGS2 com o DR no centro apresenta uma redução de 46% da frequência de ressonância para o resultado numérico e uma redução de 44% da frequência de ressonância para o resultado experimental em relação ao DGS2 sem o DR. Além da frequência de ressonância também verificou-se a largura de banda, calculada em -10 dB, para esse parâmetro houve uma redução de 76% para o resultado numérico e uma redução de 79% para o resultado experimental da DGS2 com o DR no centro em relação à DGS2 sem o DR.

Ainda na DGS2, observou-se que o DGS2 com o DR na quina apresenta uma redução de 68% da frequência de ressonância para o resultado numérico e uma redução de 67% da

frequência de ressonância para o resultado experimental, em relação ao DGS2 sem o DR. Já para a largura de banda, calculada em -10 dB, houve uma redução de 92% para o resultado numérico e uma redução de 94% para o resultado experimental da DGS2 com o DR na quina em relação à DGS2 sem o DR.

Na Tabela 3, são apresentados em resumo os dados analisados a partir da Figura 24.

Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos para a DGS2.

	DGS2	DGS2_{centro}	DGS2_{quina}
$(dpx \times dpy)(mm \times mm)$	–	0×0	$3,25 \times 2,75$
$f_{res.num.}$ (GHz)	2,71	1,46	0,86
$f_{res.exp.}$ (GHz)	2,74	1,53	0,90
$f_{res.calc.}$ (GHz)	2,87	–	–
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.num.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	0,91%	4,56%	-4,44%
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.calc.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	-4,80%	–	–
$\frac{(f_{res.num.} - f_{res.-centro.num.})}{f_{res.num.}} \times 100\%$	–	46%	–
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.-centro.exp.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	–	44%	–
$\frac{(f_{res.num.} - f_{res.-quina.num.})}{f_{res.DGS2.num.}} \times 100\%$	–	–	68%
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.-quina.exp.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	–	–	67%
BW num. (- 10 dB)(GHz)	0,78	0,19	0,06
BW exp. (- 10 dB)(GHz)	0,88	0,19	0,05
$\frac{(BW_{centro.num.} - BW_{num.})}{BW_{num.}} \times 100\%$	–	76%	–
$\frac{(BW_{centro.exp.} - BW_{exp.})}{BW_{exp.}} \times 100\%$	–	79%	–
$\frac{(BW_{quina.num.} - BW_{num.})}{BW_{num.}} \times 100\%$	–	–	92%
$\frac{(BW_{quina.exp.} - BW_{exp.})}{BW_{exp.}} \times 100\%$	–	–	94%

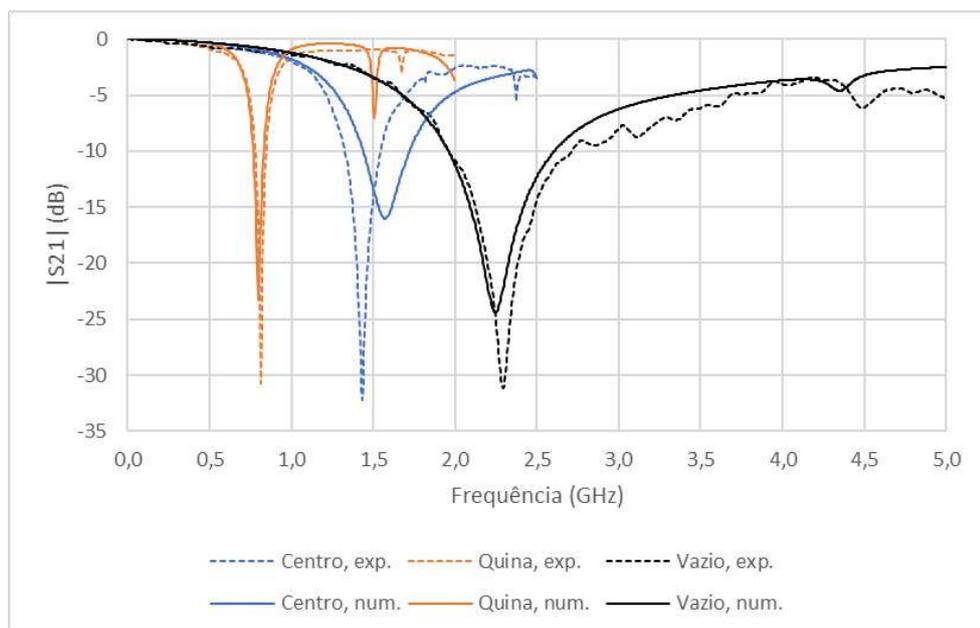


Figura 25 - Resposta em frequência da DGS3 matrioska e miniaturas do filtro DGS-matrioska.

Fonte: Autor.

Nos resultados da DGS3, Figura 25, sem o DR, percebe-se uma redução da frequência de ressonância em comparação com a DGS2, que foi de $2,25 \text{ GHz}$ de forma numérica e de $2,29 \text{ GHz}$ de forma experimental. Comparando às frequências de ressonância obtidas de forma numérica e experimental com a frequência de ressonância obtida através das Equações (1)-(4), que foi de $2,48 \text{ GHz}$, nota-se uma boa aproximação da frequência calculada com as frequências numéricas e experimentais. Para a DGS3 com o DR no centro, a frequência de ressonância numérica foi de $1,58 \text{ GHz}$ e a frequência de ressonância experimental foi de $1,44 \text{ GHz}$. Já para a DGS3 com o DR na quina, a frequência de ressonância numérica foi $0,80 \text{ GHz}$ e a frequência de ressonância experimental foi de $0,82 \text{ GHz}$.

Comparando os resultados da DGS3, tem-se que o DGS3 com o DR no centro apresenta uma redução de 30% da frequência de ressonância para o resultado numérico e uma redução de 37% da frequência de ressonância para o resultado experimental em relação ao DGS3 sem o DR. Além da frequência de ressonância também verificou-se a largura de banda, calculada em -10 dB , para esse parâmetro houve uma redução de 56% para o resultado numérico e uma redução de 72% para o resultado experimental da DGS3 com o DR no centro em relação à DGS3 sem o DR.

Ainda na DGS3, observou-se que o DGS3 com o DR na quina apresenta uma redução de 64% da frequência de ressonância tanto para o resultado numérico quanto para o resultado

experimental em relação ao DGS3 sem o DR. Já para a largura de banda, calculada em -10 dB, houve uma redução de 90% para o resultado numérico e uma redução de 91% para o resultado experimental da DGS3 com o DR na quina em relação à DGS3 sem o DR.

Na Tabela 4, são apresentados em resumo os dados analisados a partir da Figura 25.

Tabela 4 - Resumo dos resultados obtidos para a DGS3.

	DGS3	DGS3_{centro}	DGS3_{quina}
$(dpx \times dpy)(mm \times mm)$	–	0×0	$4,00 \times 3,50$
$f_{res.num.}$ (GHz)	2,25	1,58	0,80
$f_{res.exp.}$ (GHz)	2,30	1,44	0,82
$f_{res.calc.}$ (GHz)	2,48	–	–
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.num.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	1,96%	-9,72%	-1,84%
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.calc.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	-8%	–	–
$\frac{(f_{res.num.} - f_{res.-centro.num.})}{f_{res.num.}} \times 100\%$	–	30%	–
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.-centro.exp.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	–	37%	–
$\frac{(f_{res.num.} - f_{res.-quina.num.})}{f_{res.DGS2.num.}} \times 100\%$	–	–	64%
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.-quina.exp.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	–	–	64%
BW num. (-10 dB) (GHz)	0,65	0,28	0,06
BW exp. (-10 dB) (GHz)	0,76	0,21	0,06
$\frac{(BW_{centro.num.} - BW_{num.})}{BW_{num.}} \times 100\%$	–	56%	–
$\frac{(BW_{centro.exp.} - BW_{exp.})}{BW_{exp.}} \times 100\%$	–	72%	–
$\frac{(BW_{quina.num.} - BW_{num.})}{BW_{num.}} \times 100\%$	–	–	90%
$\frac{(BW_{quina.exp.} - BW_{exp.})}{BW_{exp.}} \times 100\%$	–	–	91%

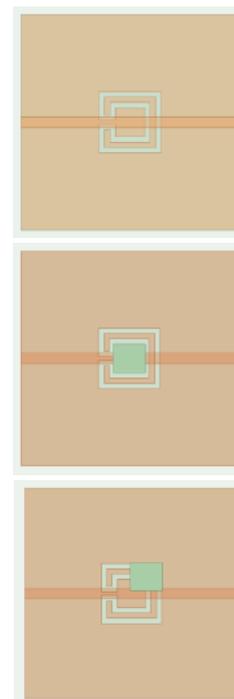
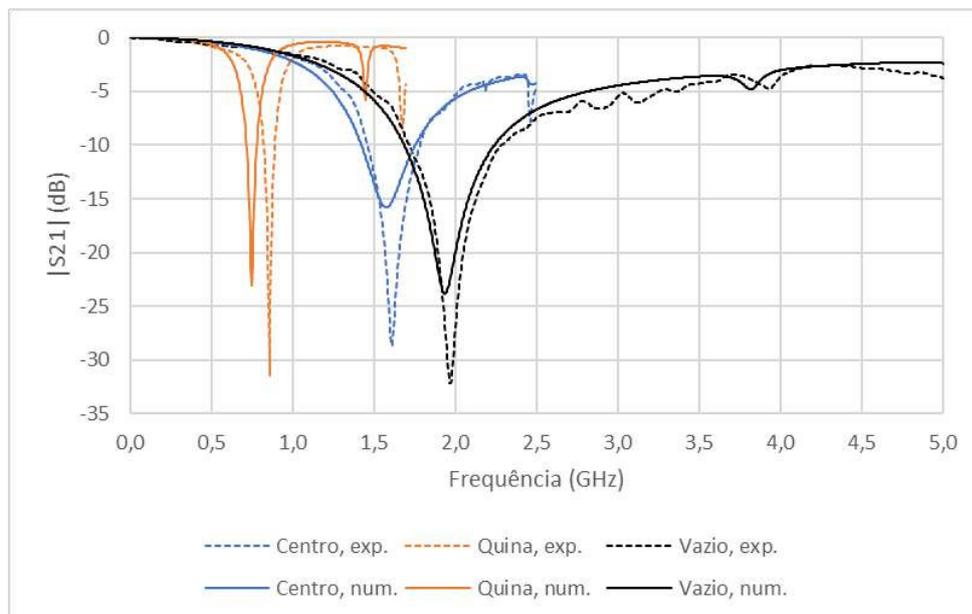


Figura 26 - Resposta em frequência da DGS4 matrioska e miniaturas do filtro DGS-matrioska.
Fonte: Autor.

Nos resultados da DGS4, Figura 26, sem o DR, percebe-se uma redução da frequência de ressonância em comparação com a DGS3, que foi de $1,94\text{ GHz}$ de forma numérica e de $1,98\text{ GHz}$ de forma experimental. Comparando às frequências de ressonância obtidas de forma numérica e experimental com a frequência de ressonância obtida através das Equações (1)-(4), que foi de $2,18\text{ GHz}$, nota-se uma boa aproximação. Para a DGS4 com o DR no centro, a frequência de ressonância numérica foi de $1,58\text{ GHz}$ e a frequência de ressonância experimental foi de $1,62\text{ GHz}$. Já para a DGS4 com o DR na quina, a frequência de ressonância numérica foi $0,75\text{ GHz}$ e a frequência de ressonância experimental foi de $0,86\text{ GHz}$.

Comparando os resultados da DGS4, tem-se que o DGS4 com o DR no centro apresenta uma redução de 19% da frequência de ressonância para o resultado numérico e uma redução de 18% da frequência de ressonância para o resultado experimental em relação ao DGS4 sem o DR. Além da frequência de ressonância também verificou-se a largura de banda, calculada em -10 dB , para esse parâmetro houve uma redução de 40% para o resultado numérico e uma redução de 44% para o resultado experimental da DGS4 com o DR no centro em relação à DGS4 sem o DR.

Ainda na DGS4, observou-se que o DGS4 com o DR na quina apresenta uma redução de 61% da frequência de ressonância para o resultado numérico e uma redução de 56% para o resultado experimental em relação ao DGS4 sem o DR. Já para a largura de banda, calculada

em -10 dB , houve uma redução de 89% para o resultado numérico e uma redução de 88% para o resultado experimental da DGS4 com o DR na quina em relação à DGS4 sem o DR.

Na Tabela 5, são apresentados em resumo os dados analisados a partir da Figura 26.

Tabela 5 - Resumo dos resultados obtidos para a DGS4.

	DGS4	DGS4_{centro}	DGS4_{quina}
$(dpx \times dpy)(mm \times mm)$	–	0×0	$4,75 \times 4,25$
$f_{res.num.} (GHz)$	1,94	1,58	0,75
$f_{res.exp.} (GHz)$	1,98	1,62	0,86
$f_{res.calc.} (GHz)$	2,18	–	–
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.num.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	1,77%	2,16%	-12,72%
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.calc.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	-10,42%	–	–
$\frac{(f_{res.num.} - f_{res.centro.num.})}{f_{res.num.}} \times 100\%$	–	19%	–
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.centro.exp.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	–	18%	–
$\frac{(f_{res.num.} - f_{res.quina.num.})}{f_{res.DGS2.num.}} \times 100\%$	–	–	61%
$\frac{(f_{res.exp.} - f_{res.quina.exp.})}{f_{res.exp.}} \times 100\%$	–	–	56%
BW num. (-10 dB)(GHz)	0,55	0,33	0,06
BW exp. (-10 dB)(GHz)	0,57	0,32	0,07
$\frac{(BW_{centro.num.} - BW_{num.})}{BW_{num.}} \times 100\%$	–	40%	–
$\frac{(BW_{centro.exp.} - BW_{exp.})}{BW_{exp.}} \times 100\%$	–	44%	–
$\frac{(BW_{quina.num.} - BW_{num.})}{BW_{num.}} \times 100\%$	–	–	89%
$\frac{(BW_{quina.exp.} - BW_{exp.})}{BW_{exp.}} \times 100\%$	–	–	88%

Nas Tabelas 6 a 11, são apresentados os dados analisados a partir das Figuras 23 a 26.

Tabela 6 - Frequência de ressonância da DGS matrioska sem DR.

	$f_{res.exp.}$ (GHz)	$f_{res.num.}$ (GHz)	$f_{res.calc.}$ (GHz)	$\frac{dif. \%}{(calc.)}$ (exp.)	$\frac{dif. \%}{(num.)}$ (exp.)
DGS1	3,56	3,84	3,64	2%	7,70%
DGS2	2,74	2,71	2,87	5%	-0,91%
DGS3	2,29	2,25	2,48	8%	-1,96%
DGS4	1,98	1,94	2,18	10%	-1,77%

Tabela 7 - Frequência de ressonância da DGS matrioska com DR no centro.

	$f_{res. exp.}$ (GHz)	$f_{res. num.}$ (GHz)	$dif. \%$ $\left(\frac{num.}{exp.}\right)$
DGS1	1,82	1,71	-5,77%
DGS2	1,53	1,46	-4,56%
DGS3	1,44	1,58	9,72%
DGS4	1,62	1,58	-2,16%

Tabela 8 - Frequência de ressonância da DGS matrioska na quina.

	$f_{res. exp.}$ (GHz)	$f_{res. num.}$ (GHz)	$dif. \%$ $\left(\frac{num.}{exp.}\right)$
DGS1	0,96	0,99	4,17%
DGS2	0,90	0,86	-4,44%
DGS3	0,82	0,80	-1,83%
DGS4	0,86	0,75	-12,72%

Tabela 9 - Largura de banda da DGS matrioska sem o DR.

	$BW_{exp.}$ -10 dB Sem DR (GHz)	$BW_{num.}$ -10 dB Sem DR (GHz)	$dif. \%$ Sem DR $\left(\frac{num.}{meas.}\right)$
DGS1	2,68	1,02	-61,90%
DGS2	0,88	0,78	-11,30%
DGS3	0,76	0,65	-14,47%
DGS4	0,57	0,55	-2,63%

Tabela 10 - Largura de banda da DGS matrioska com DR no centro.

	$BW_{exp.}$ -10 dB (GHz)	$BW_{num.}$ -10 dB (GHz)	$dif. \%$ $\left(\frac{num.}{meas.}\right)$
DGS1	0,28	0,17	-38,60%
DGS2	0,19	0,19	0,00%
DGS3	0,21	0,28	32,56%
DGS4	0,32	0,33	4,69%

Tabela 11 - Largura de banda da DGS matrioska com DR na quina.

	$BW_{exp.}$ -10 dB (GHz)	$BW_{num.}$ -10 dB (GHz)	$dif. \%$ $\left(\frac{num.}{meas.}\right)$
DGS1	0,05	0,06	9,09%
DGS2	0,05	0,06	20,00%
DGS3	0,06	0,06	0,00%
DGS4	0,07	0,06	-14,29%

Nas Figuras 27 e 28, são mostradas as frequências de ressonância obtidas variando o ($dpx \times dpy$) da DGS3, com frequências de ressonância de 0,80 GHz (região da frequência de ressonância mínima) a 2,25 GHz (região de frequência de ressonância sem DR, quando o DR está fora da região do DGS). Assim, além de reduzir a frequência de ressonância para 64% do seu valor inicial, também é possível ajustar a frequência de ressonância para valores intermediários, entre o mínimo (0,80 GHz) e o máximo (2,25 GHz).

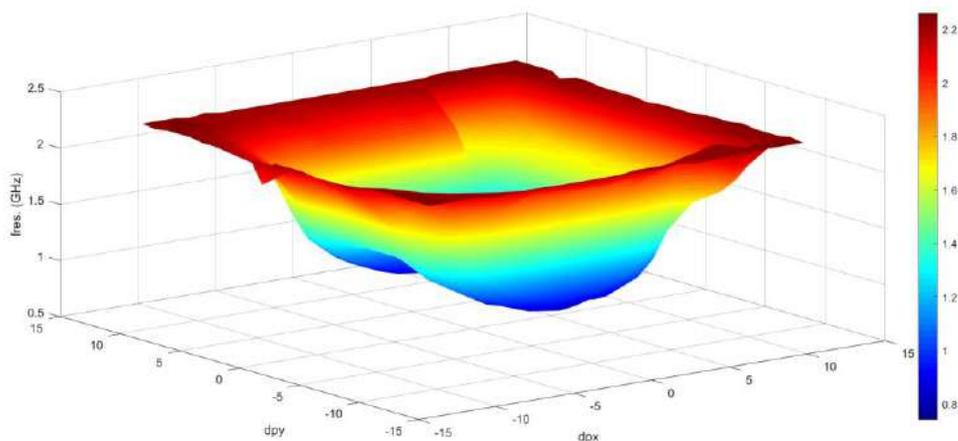


Figura 27 - Frequências de Ressonância para diferentes posições do DR (DGS3).
Fonte: Autor.

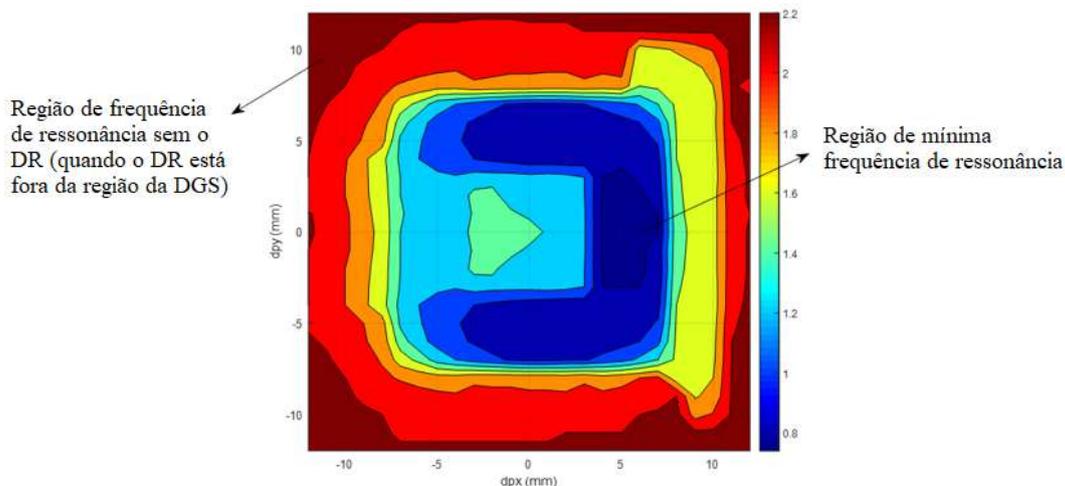


Figura 28 - Frequências de Ressonância para diferentes posições do DR (DGS3) (Vista Superior).
Fonte: Autor.

3.2. Filtro DGS-Matroska variando dimensões do DR: resultados numéricos

Com o intuito de analisar o efeito das dimensões do DR nas características esperadas do protótipo (miniaturização, seletividade e sintonia de frequência de ressonância), foram realizadas simulações numéricas. As simulações foram realizadas no ANSYS HFSS [40], com as quais foi possível avaliar o comportamento e os principais parâmetros dos filtros propostos quando as dimensões do DR variam.

Para este caso, cinco situações foram consideradas, tanto para a DGS com o DR localizado no centro da estrutura, como para a DGS com DR localizado na quina: DGS1 e DGS3 com DR no centro com dimensões variando e DGS1 e DGS3 com DR na quina com dimensões variando, considerando as dimensões do DR como: $(a \times b \times c)$, Figura 29. Em resumo, serão apresentados os resultados das seguintes estruturas:

1. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR: $9 \times 9 \times 5 \text{ (mm}^3\text{)}$;
2. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR: $9 \times 9 \times 3 \text{ (mm}^3\text{)}$;
3. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR: $9 \times 9 \times 1 \text{ (mm}^3\text{)}$;
4. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR: $7 \times 7 \times 5 \text{ (mm}^3\text{)}$;

5. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR:
 $7 \times 7 \times 3$ (mm^3);
6. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR:
 $7 \times 7 \times 1$ (mm^3);
7. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR:
 $5 \times 5 \times 5$ (mm^3);
8. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR:
 $5 \times 5 \times 3$ (mm^3);
9. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR:
 $5 \times 5 \times 1$ (mm^3);
10. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR:
 $3 \times 3 \times 5$ (mm^3);
11. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR:
 $3 \times 3 \times 3$ (mm^3);
12. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR:
 $3 \times 3 \times 1$ (mm^3);
13. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR:
 $1 \times 1 \times 5$ (mm^3);
14. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR:
 $1 \times 1 \times 3$ (mm^3);
15. DGS1 e DGS3 com ressonador dielétrico no centro e na quina, dimensão do DR:
 $1 \times 1 \times 1$ (mm^3);

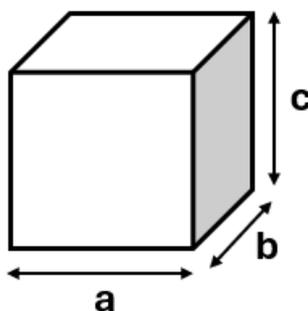


Figura 29 - Dimensões do DR.
Fonte: Autor.

Foram analisadas as frequências de ressonância e a largura de banda (BW), calculada em $-10dB$, considerando a dimensão do DR como $a \times b \times c$, temos que c é a altura do DR.

Dessa forma, os resultados foram analisados, separados em três etapas, com $c = 5\text{mm}$, com $c = 3\text{mm}$ e depois com $c = 1\text{mm}$.

3.2.1. DGS1 ($W_{ma1} = 12,0\text{ mm}$) com dimensões variando

Os resultados das simulações mencionadas acima, são apresentados nas Figuras 30-37.

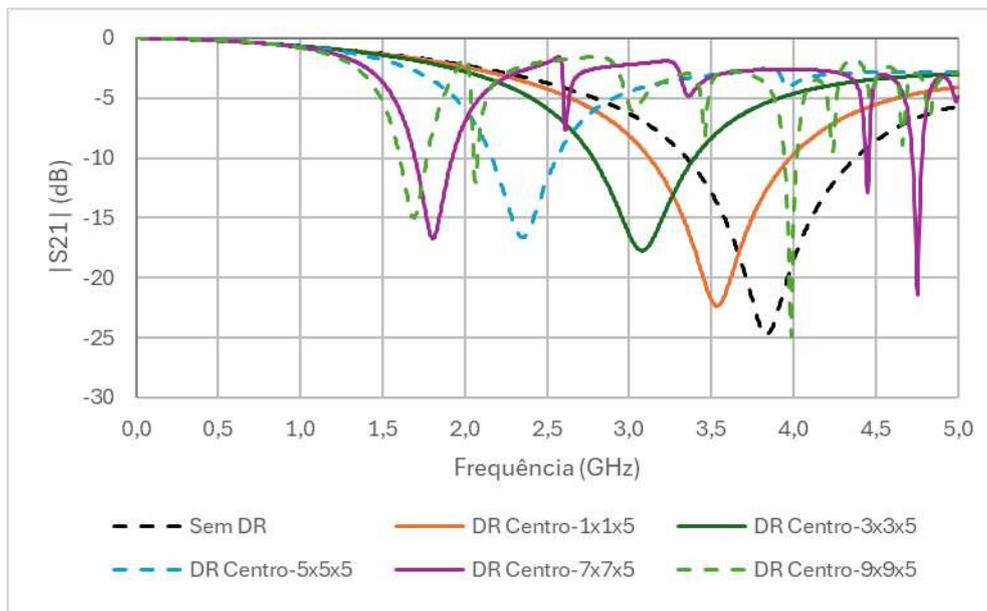


Figura 30 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 5\text{ mm}$.
Fonte: Autor.

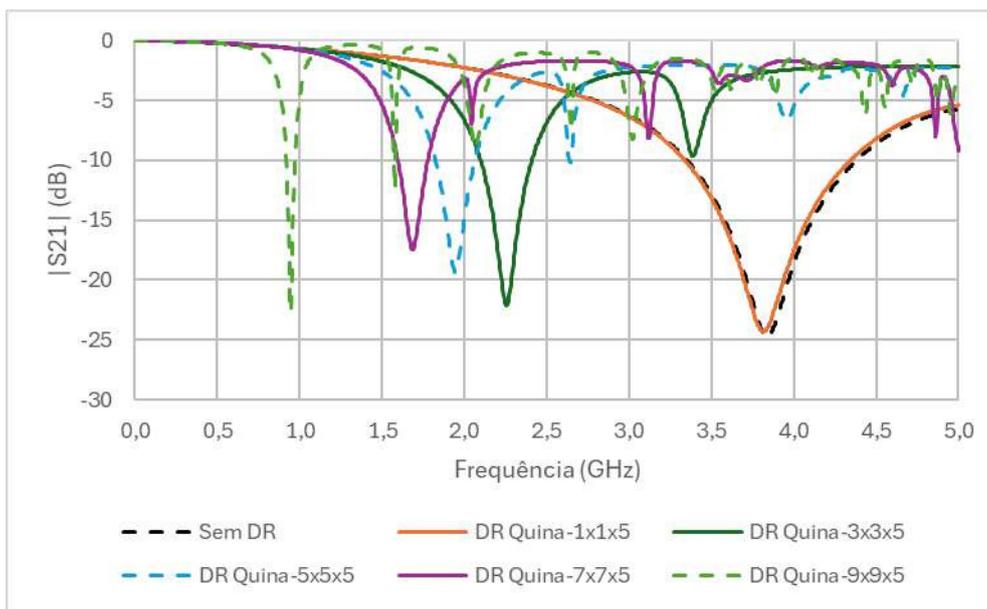


Figura 31 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 5\text{ mm}$.
Fonte: Autor.

Na Tabela 12, são apresentados em resumo os dados analisados a partir das Figuras 30 e 31.

Tabela 12 - Resumo dos resultados obtidos para DGS1 com $c = 5 \text{ mm}$.

Frequência de Ressonância			Largura de Banda		
	Centro	Quina		Centro	Quina
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $Sem \ DR$	3,84	3,84	$BW_{Sem \ DR} \text{ (GHz)}$ -10 dB	1,02	1,02
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $1 \times 1 \times 5$	3,54	3,82	$BW_{1 \times 1} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,85	1,00
$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{1 \times 1 \times 5} \right)$	-8%	-1%	$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{1 \times 1 \times 5} \right)$	-17%	-2%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 5$	3,08	2,26	$BW_{3 \times 3} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,61	0,31
$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{3 \times 3 \times 5} \right)$	-20%	-41%	$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{3 \times 3 \times 5} \right)$	-40%	-70%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $5 \times 5 \times 5$	2,36	1,95	$BW_{5 \times 5} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,39	0,23
$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{5 \times 5 \times 5} \right)$	-39%	-49%	$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{5 \times 5 \times 5} \right)$	-61%	-77%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $7 \times 7 \times 5$	1,81	1,69	$BW_{7 \times 7} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,23	0,18
$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{7 \times 7 \times 5} \right)$	-53%	-56%	$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{7 \times 7 \times 5} \right)$	-78%	-82%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $9 \times 9 \times 5$	1,70	0,95	$BW_{9 \times 9} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,16	0,05
$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{9 \times 9 \times 5} \right)$	-56%	-75%	$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{9 \times 9 \times 5} \right)$	-84%	-95%

Nos resultados da DGS1 ($W_{ma1} = 12,0 \text{ mm}$) com o DR de dimensão $c = 5 \text{ mm}$, Figura 30 e 31, com o aumento das dimensões ($a \times b$) do DR foi possível observar uma maior redução na frequência de ressonância e na largura de banda.

Para a maior dimensão de ($a \times b$), que foi de $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, quando comparado com a DGS sem o DR, a frequência de ressonância teve uma redução de 56% com o DR no centro, já para a menor dimensão de ($a \times b$), $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução na frequência foi de 8% com o DR centro. No caso da largura de banda, este comportamento se repete, quando a dimensão é maior, $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução é de 84% com o DR no centro e para a menor dimensão, $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução foi de 17%.

Comparando os resultados obtidos com a mudança na posição do DR, com a DGS sem o DR, nota-se que tanto para a frequência de ressonância como para a largura de banda, ocorre uma maior redução quando o DR é posicionado na quina da estrutura. Para a dimensão

$5 \times 5 \times 5$ (mm^3), por exemplo, a frequência de ressonância reduz 39% com o DR no centro e 49% com o DR na quina, o mesmo efeito é observado na largura de banda, que reduz 61% com o DR no centro e 77% com o DR na quina.

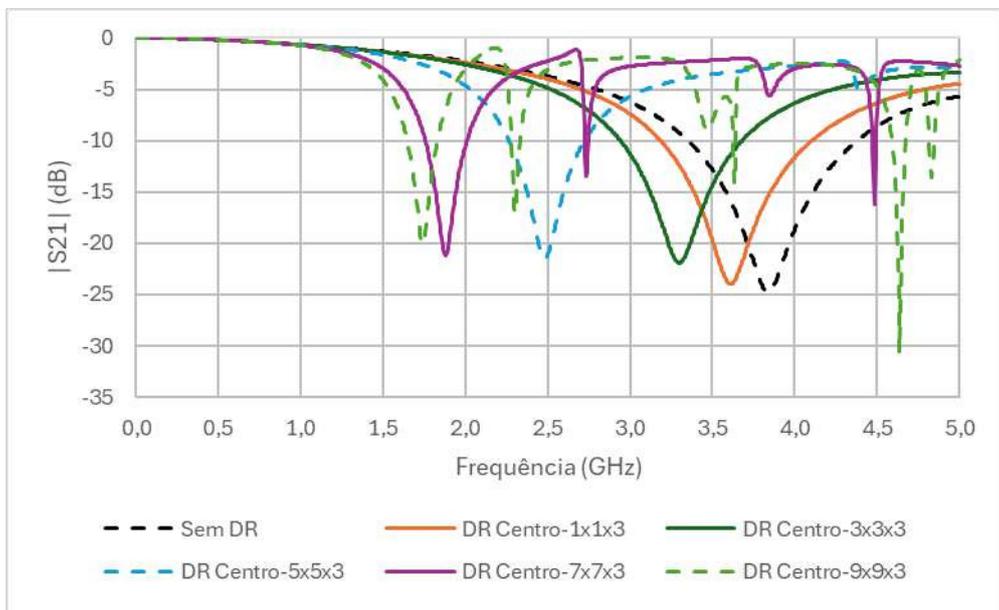


Figura 32 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 3$ mm.
Fonte: Autor.

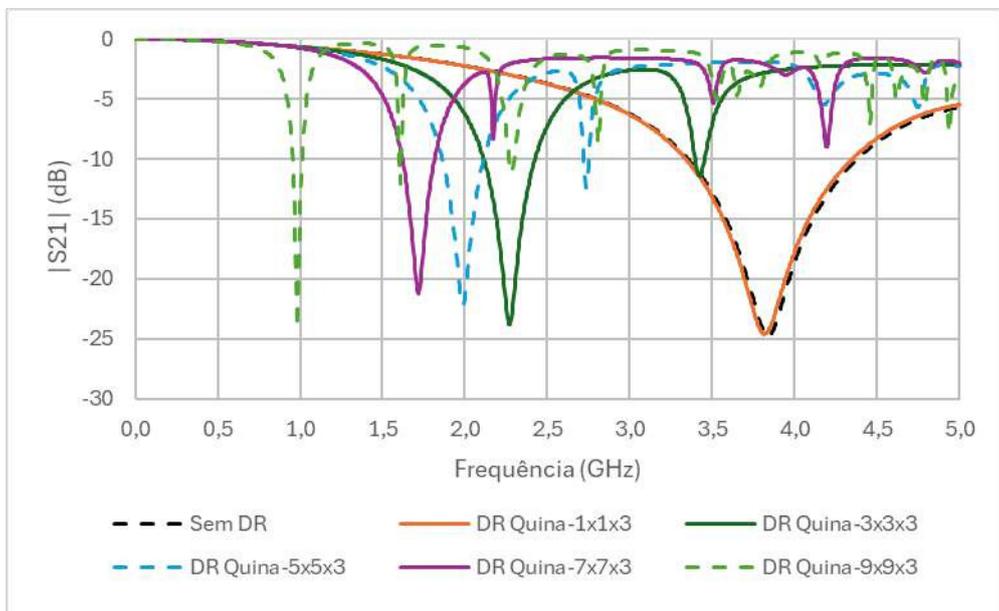


Figura 33 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 3$ mm.
Fonte: Autor.

Na Tabela 13, são apresentados em resumo os dados analisados a partir das Figuras 32 e 33.

Tabela 13 - Resumo dos resultados obtidos para DGS1 com $c = 3 \text{ mm}$.

Frequência de Ressonância			Largura de Banda		
	Centro	Quina		Centro	Quina
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ <i>Sem DR</i>	3,84	3,84	$BW_{Sem DR} \text{ (GHz)}$ -10 dB	1,02	1,02
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $1 \times 1 \times 3$	3,61	3,82	$BW_{1 \times 1} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,91	1,01
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{1 \times 1 \times 3} \right)$	-6%	-1%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{1 \times 1 \times 3} \right)$	-11%	-1%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 3$	3,30	2,28	$BW_{3 \times 3} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,74	0,31
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 3} \right)$	-14%	-41%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 3} \right)$	-28%	-69%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $5 \times 5 \times 3$	2,49	1,99	$BW_{5 \times 5} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,45	0,25
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{5 \times 5 \times 3} \right)$	-35%	-48%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{5 \times 5 \times 3} \right)$	-56%	-76%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $7 \times 7 \times 3$	1,89	1,72	$BW_{7 \times 7} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,25	0,19
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{7 \times 7 \times 3} \right)$	-51%	-55%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{7 \times 7 \times 3} \right)$	-76%	-81%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $9 \times 9 \times 3$	1,75	0,99	$BW_{9 \times 9} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,18	0,06
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{9 \times 9 \times 3} \right)$	-54%	-74%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{9 \times 9 \times 3} \right)$	-82%	-94%

Nos resultados da DGS1 ($W_{ma1} = 12,0 \text{ mm}$) com o DR de dimensão $c = 3 \text{ mm}$, Figura 32 e 33, com o aumento das dimensões ($a \times b$) do DR foi possível observar uma maior redução na frequência de ressonância e na largura de banda.

Para a maior dimensão de ($a \times b$), que foi de $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, quando comparado com a DGS sem o DR, a frequência de ressonância teve uma redução de 54% com o DR no centro, já para a menor dimensão de ($a \times b$), $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução na frequência foi de 6% com o DR centro. No caso da largura de banda, este comportamento se repete, quando a dimensão é maior, $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução é de 82% com o DR no centro e para a menor dimensão, $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução foi de 11%.

Comparando os resultados obtidos com a mudança na posição do DR, com a DGS sem o DR, nota-se que tanto para a frequência de ressonância como para a largura de banda, ocorre uma maior redução quando o DR é posicionado na quina da estrutura. Para a dimensão $5 \times 5 \times 3 \text{ (mm}^3\text{)}$, por exemplo, a frequência de ressonância reduz 35% com o DR no centro e 48% com o DR na quina, o mesmo efeito é observado na largura de banda, que reduz 56% com o DR no centro e 76% com o DR na quina.

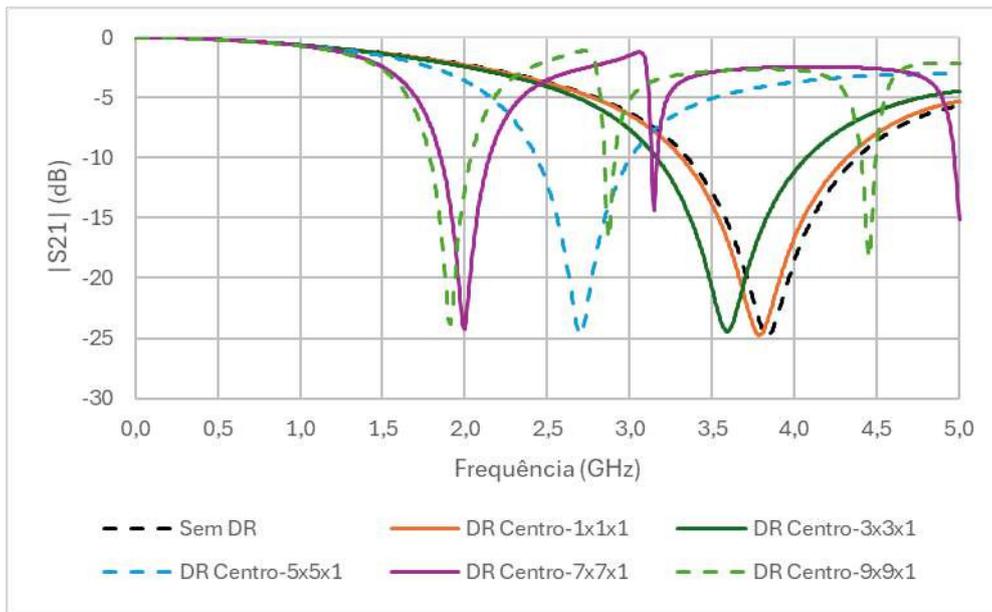


Figura 34 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 1 \text{ mm}$.
Fonte: Autor.

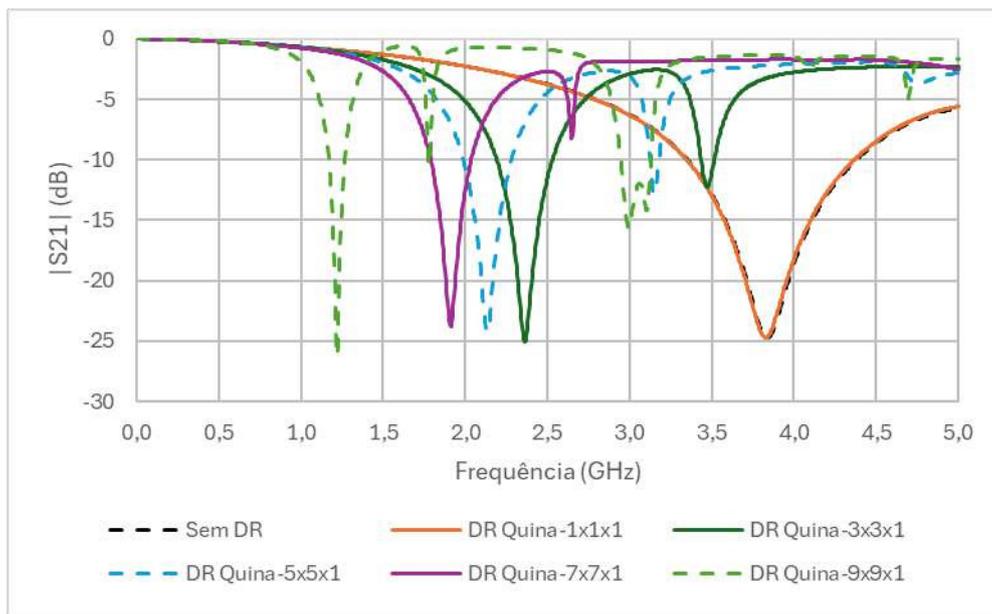


Figura 35 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 1 \text{ mm}$.
Fonte: Autor.

Na Tabela 14, são apresentados em resumo os dados analisados a partir das Figuras 34 e 35.

Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos para DGS1 com $c = 1 \text{ mm}$.

Frequência de Ressonância			Largura de Banda		
	Centro	Quina		Centro	Quina
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $Sem \ DR$	3,84	3,84	$BW_{Sem \ DR} \text{ (GHz)}$ -10 dB	1,02	1,02
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $1 \times 1 \times 1$	3,79	3,83	$BW_{1 \times 1} \text{ (GHz)}$ -10 dB	1,00	1,02
$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{1 \times 1 \times 1} \right)$	-1%	-0,3%	$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{1 \times 1 \times 1} \right)$	-2%	-0%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 1$	3,59	2,37	$BW_{3 \times 3} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,91	0,34
$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{3 \times 3 \times 1} \right)$	-6%	-38%	$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{3 \times 3 \times 1} \right)$	-11%	-67%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $5 \times 5 \times 1$	2,70	2,14	$BW_{5 \times 5} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,57	0,29
$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{5 \times 5 \times 1} \right)$	-30%	-44%	$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{5 \times 5 \times 1} \right)$	-44%	-71%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $7 \times 7 \times 1$	2,00	1,92	$BW_{7 \times 7} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,29	0,25
$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{7 \times 7 \times 1} \right)$	-48%	-50%	$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{7 \times 7 \times 1} \right)$	-71%	-76%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $9 \times 9 \times 1$	1,92	1,22	$BW_{9 \times 9} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,25	0,10
$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{9 \times 9 \times 1} \right)$	-50%	-68%	$dif. \% \left(\frac{Sem \ DR}{9 \times 9 \times 1} \right)$	-76%	-90%

Nos resultados da DGS1 ($W_{ma1} = 12,0 \text{ mm}$) com o DR de dimensão $c = 1 \text{ mm}$, Figura 34 e 35, com o aumento das dimensões ($a \times b$) do DR foi possível observar uma maior redução na frequência de ressonância e na largura de banda.

Para a maior dimensão de ($a \times b$), que foi de $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, quando comparado com a DGS sem o DR, a frequência de ressonância teve uma redução de 50% com o DR no centro, já para a menor dimensão de ($a \times b$), $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução na frequência foi de 1% com o DR centro. No caso da largura de banda, este comportamento se repete, quando a dimensão é maior, $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução é de 76% com o DR no centro e para a menor dimensão, $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução foi de 2%.

Comparando os resultados obtidos com a mudança na posição do DR, com a DGS sem o DR, nota-se que tanto para a frequência de ressonância como para a largura de banda, ocorre uma maior redução quando o DR é posicionado na quina da estrutura. Para a dimensão $5 \times 5 \times 1 \text{ (mm}^3\text{)}$, por exemplo, a frequência de ressonância reduz 30% com o DR no centro e 44% com o DR na quina, o mesmo efeito é observado na largura de banda, que reduz 44% com o DR no centro e 71% com o DR na quina.

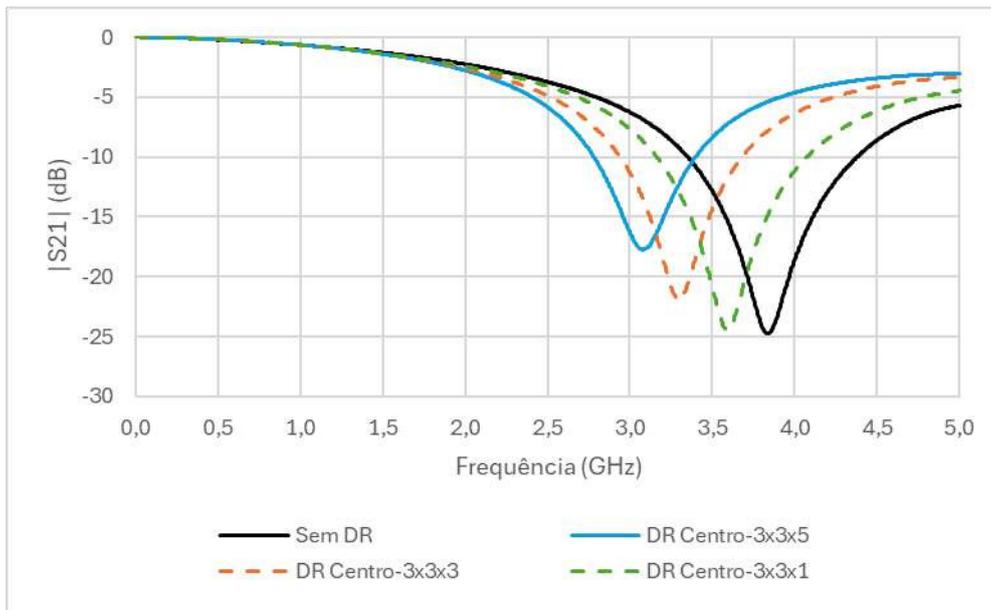


Figura 36 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR no centro, $a = 3 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ e c variando.
Fonte: Autor.

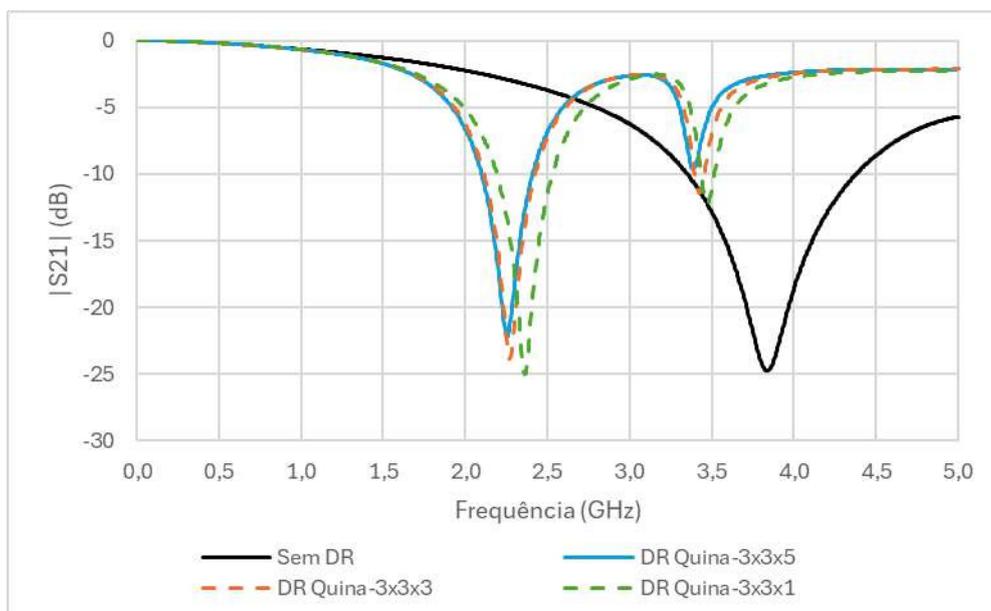


Figura 37 - Resposta em Frequência da DGS1 com DR na quina, $a = 3 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ e c variando.
Fonte: Autor.

Nas Tabelas 15, são apresentados em resumo os dados analisados a partir das Figuras 36 e 37.

Tabela 15 - Resumo dos resultados obtidos para DGS1 com $a = 3 \text{ mm}$ e $b = 3 \text{ mm}$.

Frequência de Ressonância			Largura de Banda		
	Centro	Quina		Centro	Quina
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ <i>Sem DR</i>	3,84	3,84	$BW_{Sem DR} \text{ (GHz)}$ -10 dB	1,02	1,02
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 1$	3,59	2,37	$BW_{3 \times 3 \times 1} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,91	0,34
$diff. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 1} \right)$	-6%	-38%	$diff. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 1} \right)$	-11%	-67%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 3$	3,30	2,28	$BW_{3 \times 3 \times 3} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,74	0,31
$diff. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 3} \right)$	-14%	-41%	$diff. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 3} \right)$	-28%	-69%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 5$	3,08	2,26	$BW_{3 \times 3 \times 5} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,61	0,31
$diff. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 5} \right)$	-20%	-41%	$diff. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 5} \right)$	-40%	-70%

Com o intuito de avaliar o efeito da altura, dimensão c , variou-se a dimensão c e as dimensões ($a \times b$) se mantiveram constantes. Nos resultados da DGS1 ($W_{ma1} = 12,0 \text{ mm}$) com o DR de dimensão $a = 3 \text{ mm}$ e $b = 3 \text{ mm}$, Figura 36 e 37, com o aumento da altura do DR, c , foi possível observar uma maior redução na frequência de ressonância e na largura de banda.

Para a maior dimensão, com $c = 5 \text{ mm}$, quando comparado com a DGS sem o DR, a frequência de ressonância teve uma redução de 20% com o DR no centro, já para a menor dimensão, com $c = 1 \text{ mm}$, a redução na frequência foi de 6% com o DR centro. No caso da largura de banda, este comportamento se repete, quando a dimensão é maior, $c = 5 \text{ mm}$, a redução é de 40% com o DR no centro e para a menor dimensão, $c = 1 \text{ mm}$, a redução foi de 11%.

Comparando os resultados obtidos com a mudança na posição do DR, com a DGS sem o DR, nota-se que tanto para a frequência de ressonância como para a largura de banda, ocorre uma maior redução quando o DR é posicionado na quina da estrutura. Para a dimensão $3 \times 3 \times 3 \text{ (mm}^3\text{)}$, por exemplo, a frequência de ressonância reduz 14% com o DR no centro e 41% com o DR na quina, o mesmo efeito é observado na largura de banda, que reduz 28% com o DR no centro e 69% com o DR na quina.

3.2.2. DGS3 ($W_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$) com dimensões variando

Os resultados das simulações para a DGS3 são apresentados nas Figuras 38-45.

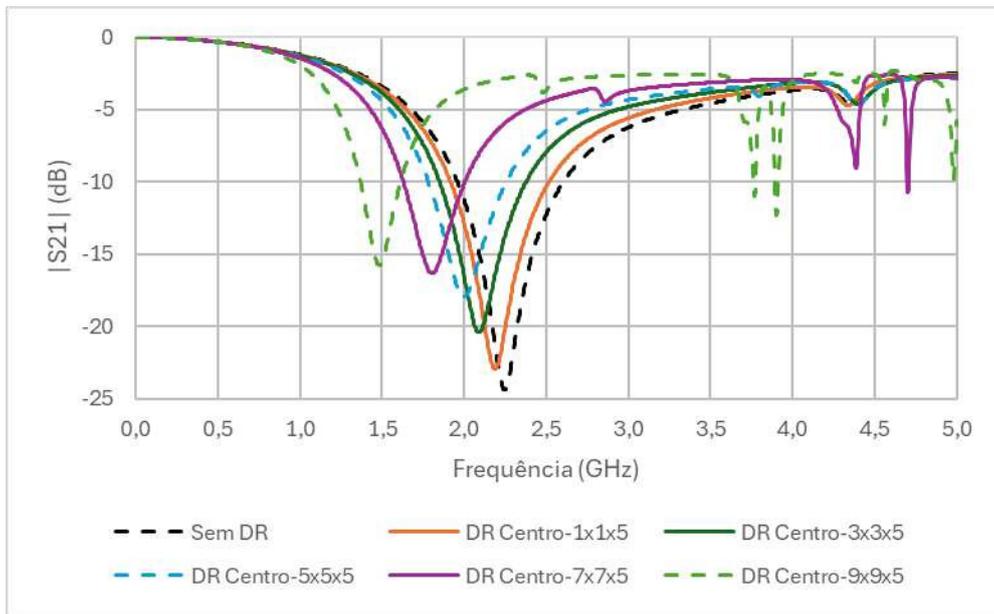


Figura 38 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 5 \text{ mm}$.
Fonte: Autor.

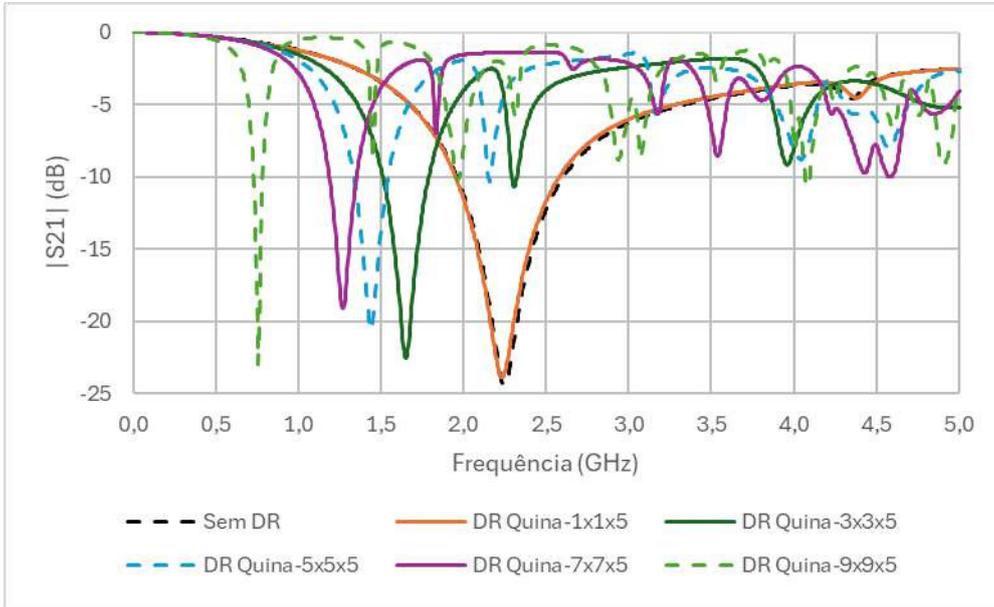


Figura 39 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 5 \text{ mm}$.
Fonte: Autor.

Na Tabela 16, são apresentados em resumo os dados analisados a partir das Figuras 38 e 39.

Tabela 16 - Resumo dos resultados obtidos para DGS3 com $c = 5 \text{ mm}$.

Frequência de Ressonância			Largura de Banda		
	Centro	Quina		Centro	Quina
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ <i>Sem DR</i>	2,25	2,25	$BW_{Sem DR} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,65	0,65
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $1 \times 1 \times 5$	2,19	2,24	$BW_{1 \times 1} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,60	0,62
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{1 \times 1 \times 5} \right)$	-3%	-1%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{1 \times 1 \times 5} \right)$	-8%	-4%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 5$	2,09	1,66	$BW_{3 \times 3} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,53	0,27
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 5} \right)$	-7%	-26%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 5} \right)$	-18%	-58%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $5 \times 5 \times 5$	2,00	1,45	$BW_{5 \times 5} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,47	0,20
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{5 \times 5 \times 5} \right)$	-11%	-36%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{5 \times 5 \times 5} \right)$	-27%	-68%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $7 \times 7 \times 5$	1,81	1,28	$BW_{7 \times 7} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,38	0,16
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{7 \times 7 \times 5} \right)$	-20%	-46%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{7 \times 7 \times 5} \right)$	-42%	-75%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $9 \times 9 \times 5$	1,49	0,79	$BW_{9 \times 9} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,24	0,05
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{9 \times 9 \times 5} \right)$	-34%	-66%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{9 \times 9 \times 5} \right)$	-62%	-92%

Nos resultados da DGS3 ($W_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$) com o DR de dimensão $c = 5 \text{ mm}$, Figura 38 e 39, com o aumento das dimensões ($a \times b$) do DR foi possível observar uma maior redução na frequência de ressonância e na largura de banda.

Para a maior dimensão de ($a \times b$), que foi de $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, quando comparado com a DGS sem o DR, a frequência de ressonância teve uma redução de 34% com o DR no centro, já para a menor dimensão de ($a \times b$), $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução na frequência foi de 3% com o DR centro. No caso da largura de banda, este comportamento se repete, quando a dimensão é maior, $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução é de 62% com o DR no centro e para a menor dimensão, $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução foi de 8%.

Comparando os resultados obtidos com a mudança na posição do DR, com a DGS sem o DR, nota-se que tanto para a frequência de ressonância como para a largura de banda, ocorre uma maior redução quando o DR é posicionado na quina da estrutura. Para a dimensão $5 \times 5 \times 1 \text{ (mm}^3\text{)}$, por exemplo, a frequência de ressonância reduz 11% com o DR no centro e 36% com o DR na quina, o mesmo efeito é observado na largura de banda, que reduz 27% com o DR no centro e 68% com o DR na quina.

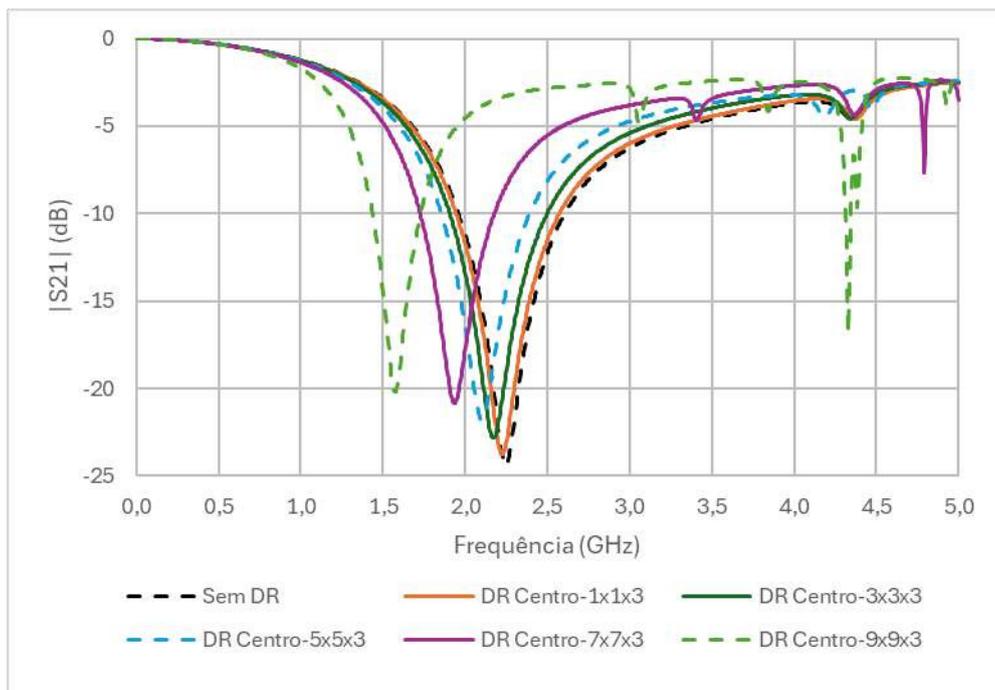


Figura 40 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 3 \text{ mm}$.
Fonte: Autor.

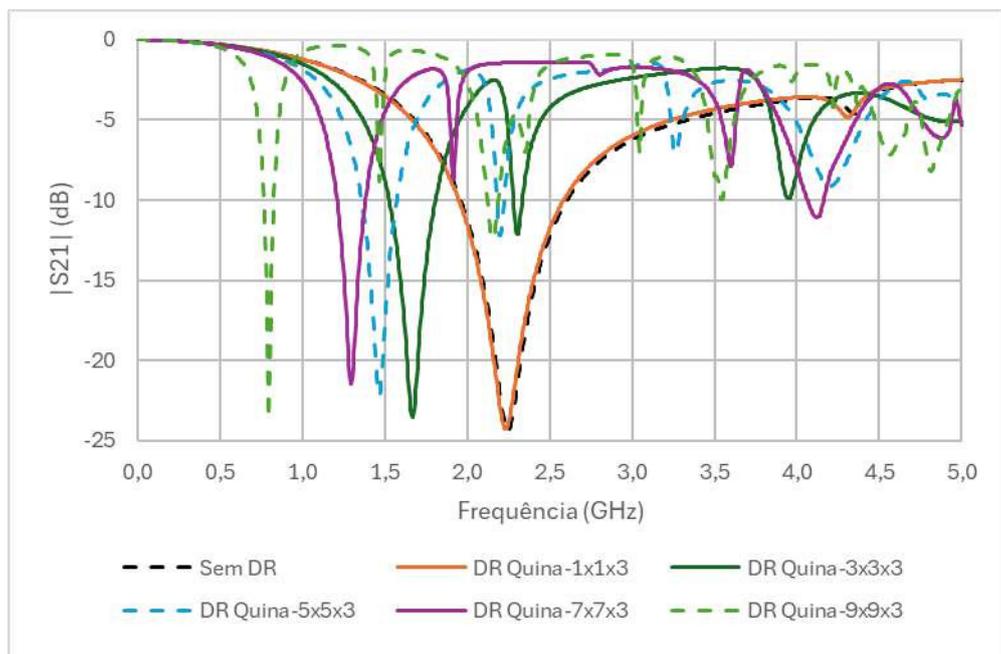


Figura 41 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 3 \text{ mm}$.
Fonte: Autor.

Na Tabela 17, são apresentados em resumo os dados analisados a partir das Figuras 40 e 41.

Tabela 17 - Resumo dos resultados obtidos para DGS3 com $c = 3 \text{ mm}$.

Frequência de Ressonância			Largura de Banda		
	Centro	Quina		Centro	Quina
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ <i>Sem DR</i>	2,25	2,25	$BW_{Sem DR} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,65	0,65
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $1 \times 1 \times 3$	2,23	2,23	$BW_{1 \times 1} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,62	0,64
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{1 \times 1 \times 3} \right)$	-1%	-1%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{1 \times 1 \times 3} \right)$	-4%	-2%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 3$	2,17	1,67	$BW_{3 \times 3} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,59	0,28
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 3} \right)$	-3%	-26%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 3} \right)$	-9%	-57%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $5 \times 5 \times 3$	2,10	1,47	$BW_{5 \times 5} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,54	0,21
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{5 \times 5 \times 3} \right)$	-6%	-35%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{5 \times 5 \times 3} \right)$	-17%	-67%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $7 \times 7 \times 3$	1,94	1,30	$BW_{7 \times 7} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,45	0,17
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{7 \times 7 \times 3} \right)$	-14%	-42%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{7 \times 7 \times 3} \right)$	-31%	-74%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $9 \times 9 \times 3$	1,58	0,80	$BW_{9 \times 9} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,29	0,06
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{9 \times 9 \times 3} \right)$	-30%	-64%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{9 \times 9 \times 3} \right)$	-55%	-91%

Nos resultados da DGS3 ($W_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$) com o DR de dimensão $c = 3 \text{ mm}$, Figura 40 e 41, com o aumento das dimensões ($a \times b$) do DR foi possível observar uma maior redução na frequência de ressonância e na largura de banda.

Para a maior dimensão de ($a \times b$), que foi de $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, quando comparado com a DGS sem o DR, a frequência de ressonância teve uma redução de 30% com o DR no centro, já para a menor dimensão de ($a \times b$), $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução na frequência foi de 1% com o DR centro. No caso da largura de banda, este comportamento se repete, quando a dimensão é maior, $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução é de 55% com o DR no centro e para a menor dimensão, $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução foi de 4%.

Comparando os resultados obtidos com a mudança na posição do DR, com a DGS sem o DR, nota-se que tanto para a frequência de ressonância como para a largura de banda, ocorre uma maior redução quando o DR é posicionado na quina da estrutura. Para a dimensão $5 \times 5 \times 3 \text{ (mm}^3\text{)}$, por exemplo, a frequência de ressonância reduz 6% com o DR no centro e

35% com o DR na quina, o mesmo efeito é observado na largura de banda, que reduz 17% com o DR no centro e 67% com o DR na quina.

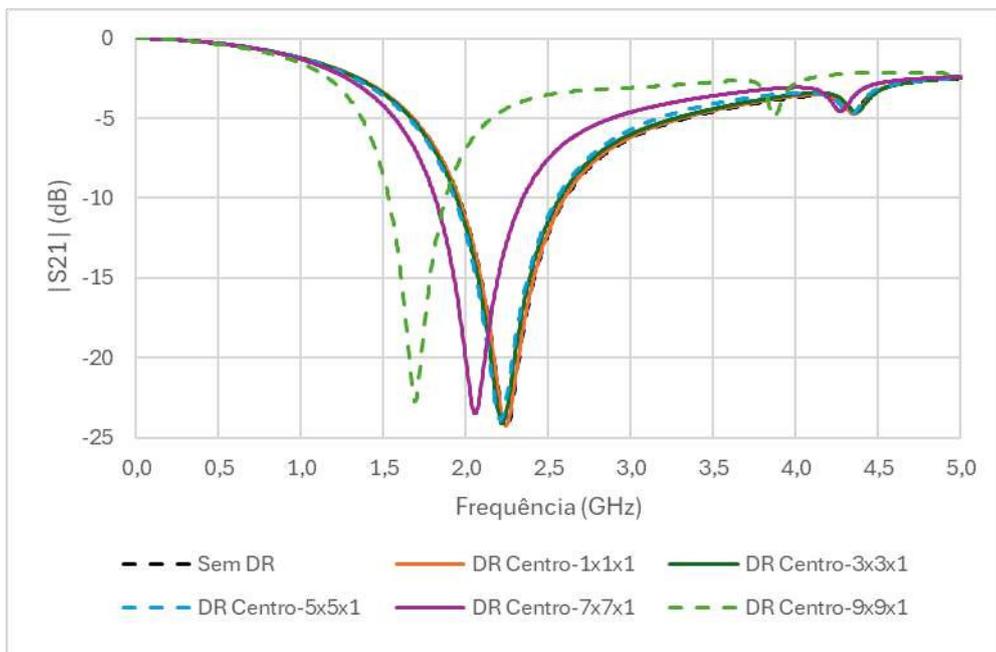


Figura 42 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR no centro, $a \times b$ variando e $c = 1 \text{ mm}$.
Fonte: Autor.

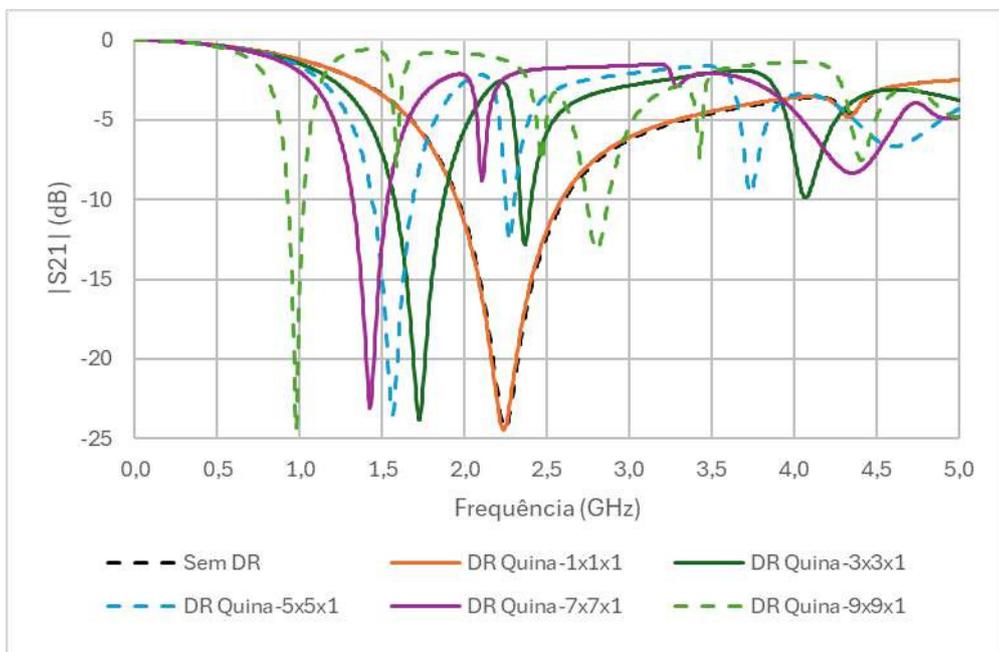


Figura 43 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR na quina, $a \times b$ variando e $c = 1 \text{ mm}$.
Fonte: Autor.

Na Tabela 18, são apresentados em resumo os dados analisados a partir das Figuras 42 e 43.

Tabela 18 - Resumo dos resultados obtidos para DGS3 com $c = 1 \text{ mm}$.

Frequência de Ressonância			Largura de Banda		
	Centro	Quina		Centro	Quina
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ <i>Sem DR</i>	2,25	2,25	$BW_{Sem DR} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,65	0,65
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $1 \times 1 \times 1$	2,24	2,24	$BW_{1 \times 1} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,64	0,64
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{1 \times 1 \times 1} \right)$	-0,2%	-0,4%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{1 \times 1 \times 1} \right)$	-2%	-2%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 1$	2,22	1,73	$BW_{3 \times 3} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,62	0,30
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 1} \right)$	-1%	-23%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 1} \right)$	-4%	-54%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $5 \times 5 \times 1$	2,21	1,57	$BW_{5 \times 5} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,62	0,24
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{5 \times 5 \times 1} \right)$	-1,5%	-30%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{5 \times 5 \times 1} \right)$	-4%	-62%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $7 \times 7 \times 1$	2,06	1,43	$BW_{7 \times 7} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,53	0,21
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{7 \times 7 \times 1} \right)$	-8%	-36%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{7 \times 7 \times 1} \right)$	-18%	-68%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $9 \times 9 \times 1$	1,70	0,98	$BW_{9 \times 9} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,34	0,09
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{9 \times 9 \times 1} \right)$	-25%	-56%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{9 \times 9 \times 1} \right)$	-47%	-85%

Nos resultados da DGS3 ($W_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$) com o DR de dimensão $c = 1 \text{ mm}$, Figura 42 e 43, com o aumento das dimensões ($a \times b$) do DR foi possível observar uma maior redução na frequência de ressonância e na largura de banda.

Para a maior dimensão de ($a \times b$), que foi de $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, quando comparado com a DGS sem o DR, a frequência de ressonância teve uma redução de 25% com o DR no centro, já para a menor dimensão de ($a \times b$), $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução na frequência foi de 0,2% com o DR centro. No caso da largura de banda, este comportamento se repete, quando a dimensão é maior, $9 \times 9 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução é de 47% com o DR no centro e para a menor dimensão, $1 \times 1 \text{ (mm}^2\text{)}$, a redução foi de 2%.

Comparando os resultados obtidos com a mudança na posição do DR, com a DGS sem o DR, nota-se que tanto para a frequência de ressonância como para a largura de banda, ocorre uma maior redução quando o DR é posicionado na quina da estrutura. Para a dimensão $5 \times 5 \times 1 \text{ (mm}^3\text{)}$, por exemplo, a frequência de ressonância reduz 1,5% com o DR no centro

e 30% com o DR na quina, o mesmo efeito é observado na largura de banda, que reduz 4% com o DR no centro e 62% com o DR na quina.

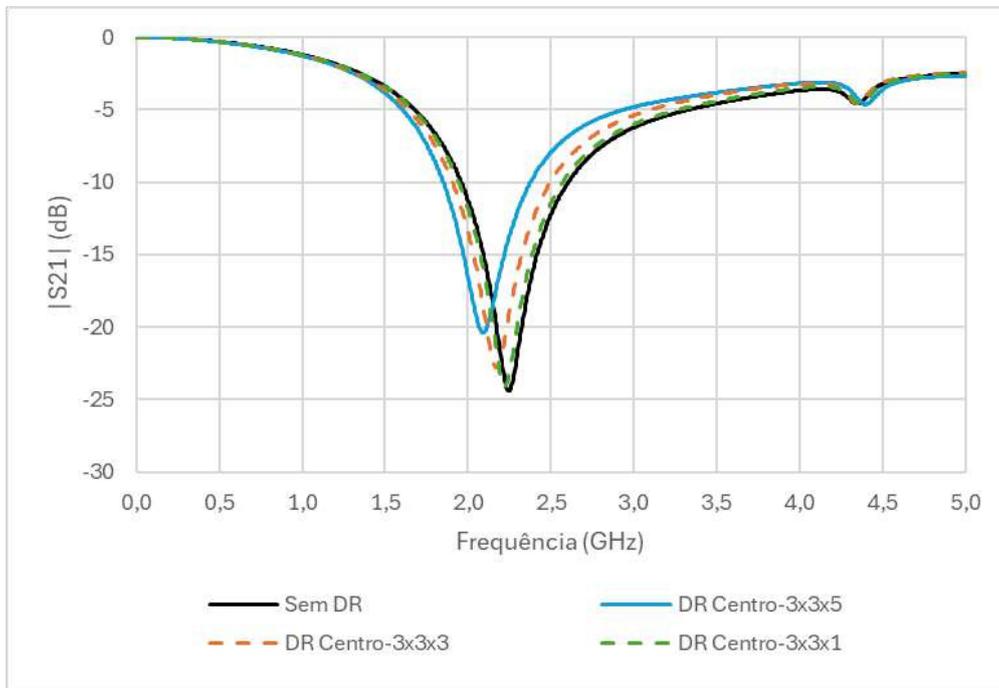


Figura 44 - Resposta em frequência da DGS3 com DR no centro, $a = 3 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ e c variando.
Fonte: Autor.

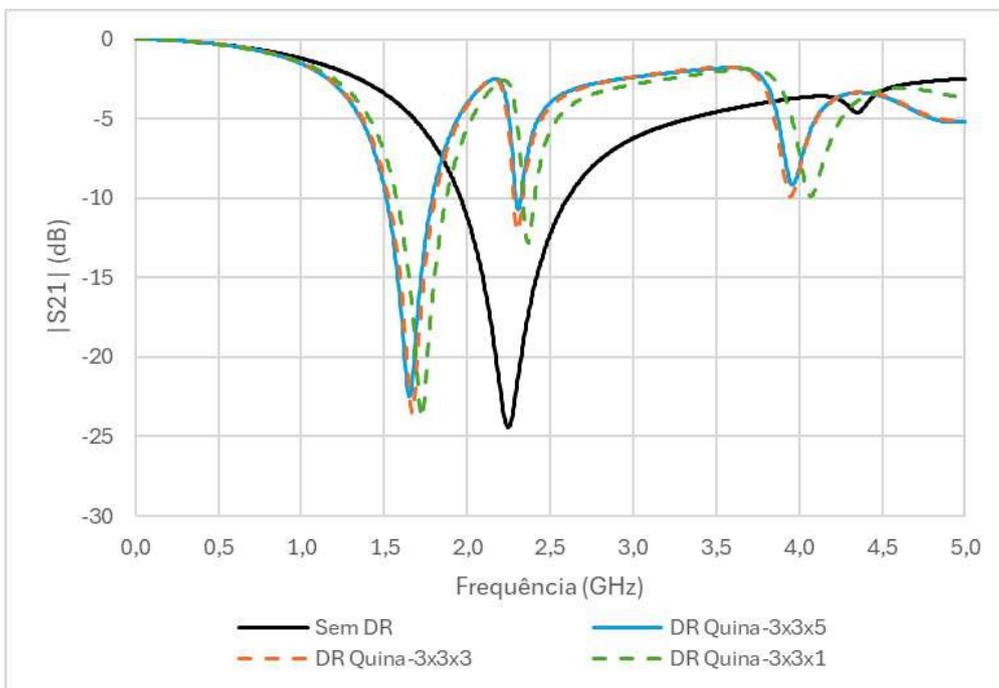


Figura 45 - Resposta em Frequência da DGS3 com DR na quina, $a = 3 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ e c variando.
Fonte: Autor.

Na Tabela 19, são apresentados em resumo os dados analisados a partir das Figuras 44 e 45.

Tabela 19 - Resumo dos resultados obtidos para DGS3 com $a = 3 \text{ mm}$ e $b = 3 \text{ mm}$.

Frequência de Ressonância			Largura de Banda		
	Centro	Quina		Centro	Quina
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ <i>Sem DR</i>	2,25	2,25	$BW_{Sem DR} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,65	0,65
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 1$	2,22	1,73	$BW_{3 \times 3 \times 1} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,62	0,30
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 1} \right)$	-1%	-23%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 1} \right)$	-4%	-54%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 3$	2,17	1,67	$BW_{3 \times 3 \times 3} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,59	0,28
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 3} \right)$	-3%	-26%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 3} \right)$	-9%	-57%
$f_{res.} \text{ (GHz)}$ $3 \times 3 \times 5$	2,09	1,66	$BW_{3 \times 3 \times 5} \text{ (GHz)}$ -10 dB	0,53	0,27
$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 5} \right)$	-7%	-26%	$dif. \% \left(\frac{Sem DR}{3 \times 3 \times 5} \right)$	-18%	-58%

Com o intuito de avaliar o efeito da altura, dimensão c , variou-se a dimensão c e as dimensões ($a \times b$) se mantiveram constantes. Nos resultados da DGS3 ($W_{ma1} = 15,5 \text{ mm}$) com o DR de dimensão $a = 3 \text{ mm}$ e $b = 3 \text{ mm}$, Figura 44 e 45, com o aumento da altura do DR, c , foi possível observar uma maior redução na frequência de ressonância e na largura de banda.

Para a maior dimensão, com $c = 5 \text{ mm}$, quando comparado com a DGS sem o DR, a frequência de ressonância teve uma redução de 7% com o DR no centro, já para a menor dimensão, com $c = 1 \text{ mm}$, a redução na frequência foi de 1% com o DR centro. No caso da largura de banda, este comportamento se repete, quando a dimensão é maior, $c = 5 \text{ mm}$, a redução é de 18% com o DR no centro e para a menor dimensão, $c = 1 \text{ mm}$, a redução foi de 4%.

Comparando os resultados obtidos com a mudança na posição do DR, com a DGS sem o DR, nota-se que tanto para a frequência de ressonância como para a largura de banda, ocorre uma maior redução quando o DR é posicionado na quina da estrutura. Para a dimensão $3 \times 3 \times 3 \text{ (mm}^3\text{)}$, por exemplo, a frequência de ressonância reduz 3% com o DR no centro e 26% com o DR na quina, o mesmo efeito é observado na largura de banda, que reduz 9% com o DR no centro e 57% com o DR na quina.

Comparando os resultados da DGS1 e da DGS3, observa-se que a DGS1 demonstra maior sensibilidade à presença do DR, com uma redução mais acentuada na frequência de ressonância e na largura de banda em relação à DGS3, tanto quando o DR é posicionado na quina quanto no centro da estrutura. Essa maior sensibilidade ocorre porque, com dimensões menores da DGS, o DR ocupa uma área proporcionalmente maior da estrutura, resultando em uma influência mais significativa nos resultados. Dependendo da aplicação desejada para o filtro DGS-matroska, a redução na frequência de ressonância e na largura de banda demonstram resultados positivos.

3.3. Análise da Densidade de Corrente dos Filtros DGS-matroska

Com o intuito de analisar a densidade de corrente dos filtros DGS-matroska e verificar o efeito que o DR produz no campo dos filtros, foram realizadas simulações numéricas. As simulações foram realizadas no ANSYS HFSS [40].

Para este caso, foram consideradas as DGS1 e DGS4 sem o DR, com o DR localizado no centro da estrutura e com DR localizado na quina. Para cada caso, foi observada a densidade de corrente da frequência anterior à frequência de ressonância, a densidade de corrente da frequência de ressonância e a densidade de corrente da frequência após a frequência de ressonância. Em resumo, serão apresentados os resultados das seguintes estruturas:

1. DGS1 e DGS4 sem DR, com frequência anterior à frequência de ressonância;
2. DGS1 e DGS4 sem DR, na frequência de ressonância;
3. DGS1 e DGS4 sem DR, com frequência posterior à frequência de ressonância;
4. DGS1 e DGS4 com DR no centro, com frequência anterior à frequência de ressonância;
5. DGS1 e DGS4 com DR no centro, na frequência de ressonância;
6. DGS1 e DGS4 com DR no centro, com frequência posterior à frequência de ressonância;
7. DGS1 e DGS4 com DR na quina, com frequência anterior à frequência de ressonância;
8. DGS1 e DGS4 com DR na quina, na frequência de ressonância;
9. DGS1 e DGS4 com DR na quina, com frequência posterior à frequência de ressonância;

Como ressonador dielétrico, DR (do inglês dielectric resonator) também foi utilizada uma cerâmica MCT-115, com dimensões $8\text{ mm} \times 9\text{ mm} \times 5\text{ mm}$.

3.3.1. Densidade de corrente da DGS1

Nas Figuras 46 a 48 estão os resultados obtidos para a densidade de corrente da DGS1.

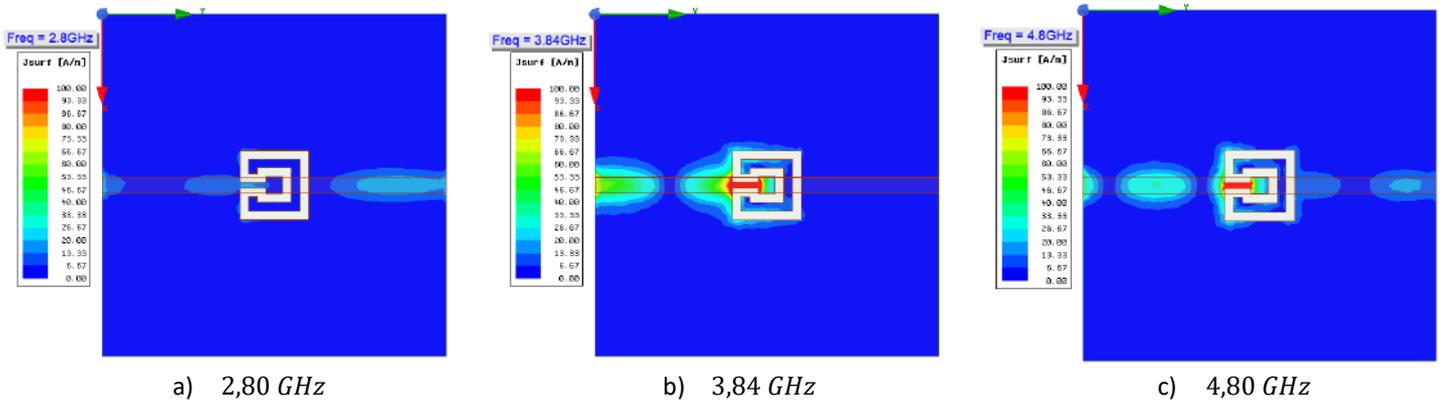


Figura 46 - Densidade de corrente da DGS1 sem DR.
 Fonte: Autor.

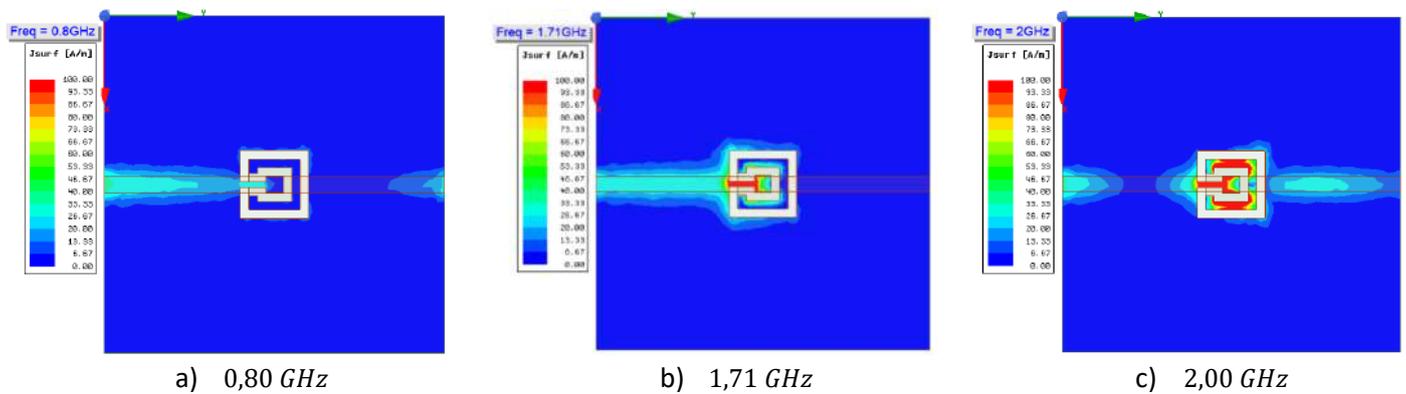


Figura 47 - Densidade de corrente da DGS1 com DR no centro.
 Fonte: Autor.

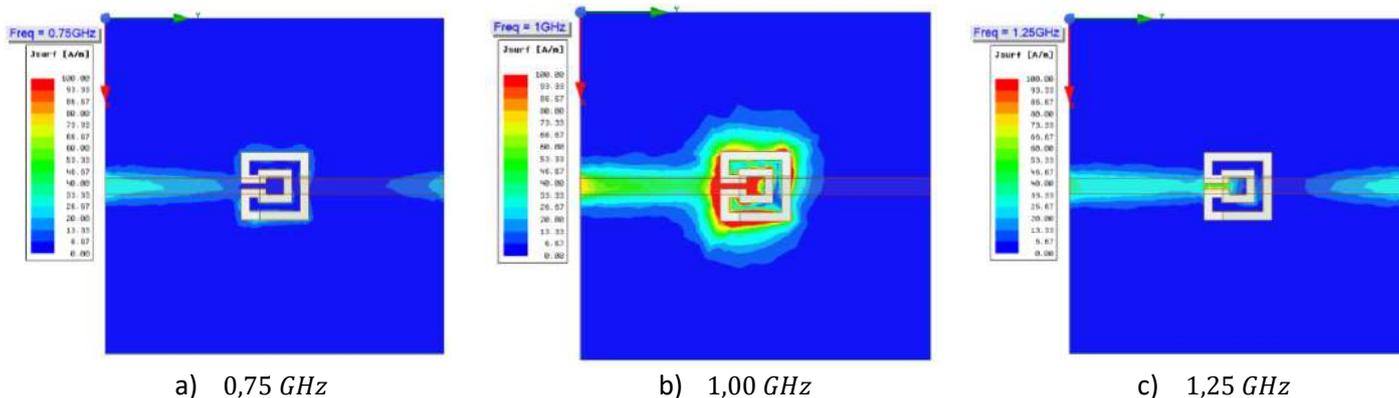


Figura 48 - Densidade de corrente da DGS1 com DR na quina.

Fonte: Autor.

Nas Figuras 46 (b), 47 (b) e 48 (b), é possível observar as densidades de corrente na frequência de ressonância da DGS1. Comparando as densidades de correntes na frequência de ressonância com as demais frequências, para a DGS1 sem DR, com o DR no centro e com o DR na quina, é possível perceber que nas demais frequências o campo passa para a saída, o que não ocorre na frequência de ressonância. Dessa forma, confirma-se o funcionamento do filtro DGS-matrioska.

Analisando os valores experimentais e numéricos da frequência de ressonância e da largura de banda, observou-se que ambos apresentam maior redução com o DR está posicionado na quina. Essa redução mais acentuada ocorre, pois, na frequência de ressonância, quando posicionado na quina da DGS, Figura 48, o DR interage de forma mais intensa com o campo em comparação ao posicionado no centro da DGS, Figura 47.

3.3.2. Densidade de corrente da DGS4

Nas Figuras 49 a 51 estão os resultados obtidos para a densidade de corrente da DGS4.

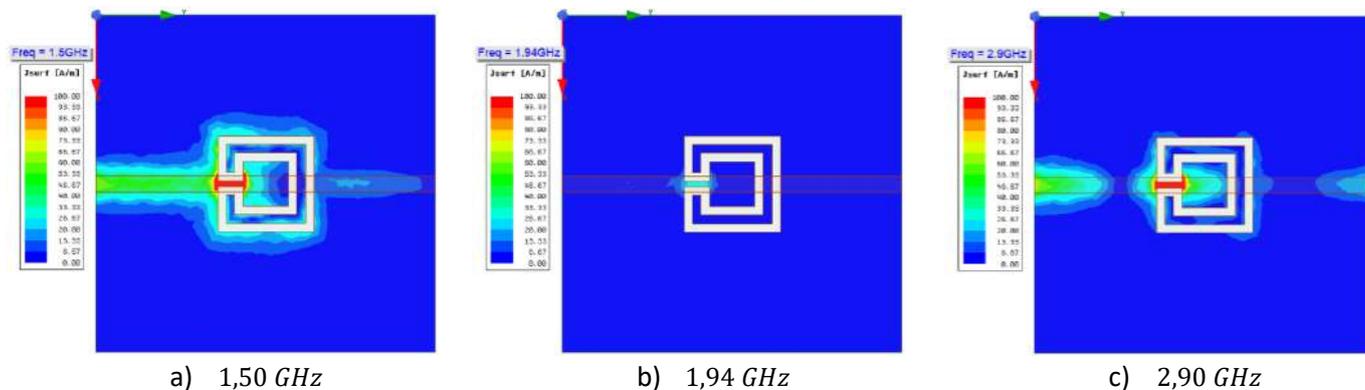


Figura 49 - Densidade de corrente da DGS4 sem DR.

Fonte: Autor.

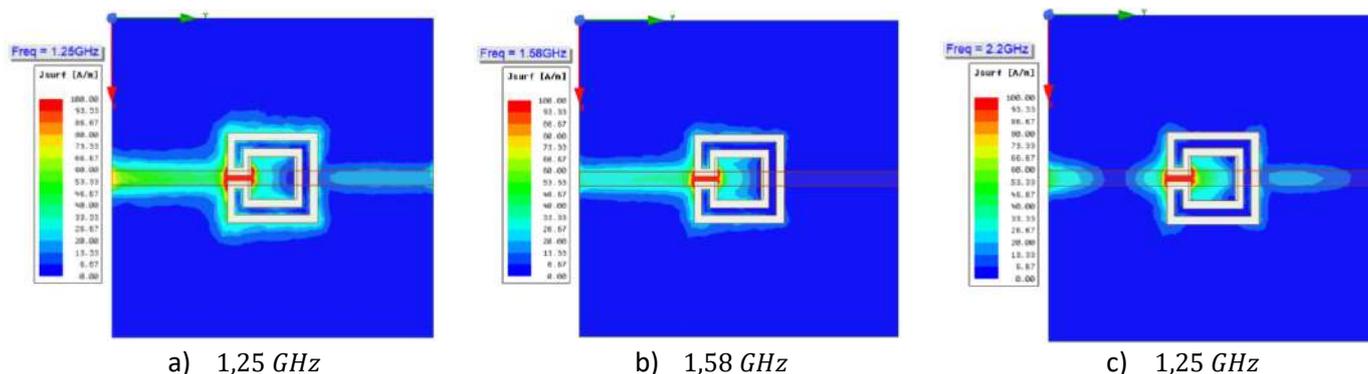


Figura 50 - Densidade de corrente da DGS4 com DR no centro.
Fonte: Autor.

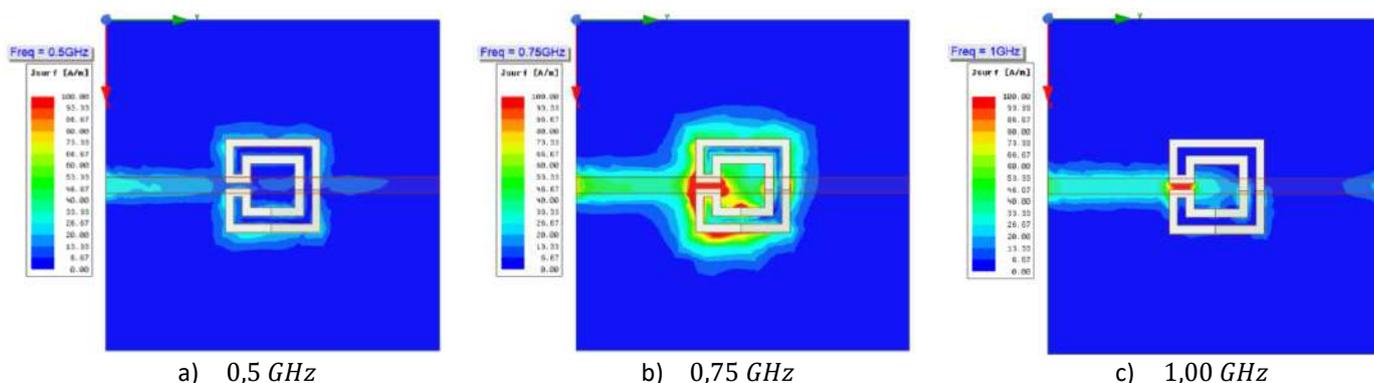


Figura 51 - Densidade de corrente da DGS4 com DR na quina.
Fonte: Autor.

Nas Figuras 49 (b), 50 (b) e 51 (b), é possível observar as densidades de corrente na frequência de ressonância da DGS4. Comparando as densidades de correntes na frequência de ressonância com as demais frequências, para a DGS4 sem DR, com o DR no centro e com o DR na quina, é possível perceber que nas demais frequências o campo passa para a saída, o que não ocorre na frequência de ressonância. Dessa forma, confirma-se o funcionamento do filtro DGS-matrioska, como um filtro rejeita faixa.

Analisando os valores experimentais e numéricos obtidos para a frequência de ressonância e para a largura de banda, observou-se que ambos apresentam maior redução quando o DR está posicionado na quina. Essa redução mais acentuada ocorre, pois, na frequência de ressonância, quando posicionado na quina da DGS, Figura 51, o DR interage de forma mais intensa com o campo em comparação ao posicionado no centro da DGS, Figura 50.

4. CONCLUSÃO

4.1. Considerações finais

Neste trabalho foram desenvolvidos e caracterizados filtros DGSs compactos baseados na geometria matrioska com anéis retangulares utilizando ressonador dielétrico.

Inicialmente, foi realizado um estudo sobre os filtros, seus princípios básicos, classificações, características e aplicações. Os filtros de micro-ondas foram enfatizados, pois os filtros DGSs-matrioska são construídos utilizando linhas de microfita. As bibliografias referentes à esta dissertação foram revisadas, a geometria matrioska foi descrita e suas equações iniciais foram propostas. Além disso, também foi avaliado o efeito da utilização do ressonador dielétrico de alta permissividade elétrica no filtro DGS-matrioska.

Para a caracterização numérica foi utilizado o módulo HFSS, do programa ANSYS Electromagnetics Suite, o que possibilitou a obtenção dos resultados numéricos a partir da realização de diversas simulações. Para a caracterização experimental, realizada no Laboratório de Medidas em Telecomunicações – LMTel, do GTEMA-IFPB, foi utilizado um analisador de redes vetorial Agilent, modelo E5071C.

Foram fabricados quatro filtro com dimensões diferentes com o intuito de avaliar o comportamento da resposta em frequência com a utilização do ressonador dielétrico de alta permissividade elétrica em filtros de dimensões distintas. O ressonador dielétrico foi aplicado em diferentes localizações do filtro DGS-matrioska, para observar a resposta em frequência dos filtros com a variação da posição do ressonador dielétrico. Também foram realizadas simulações variando o tamanho do ressonador dielétrico, visando avaliar o comportamento da resposta em frequência do filtro DGS-matrioska nesta situação.

As equações iniciais de projeto propostas apresentaram resultados satisfatórios quando comparadas com os resultados obtidos nas simulações e nas medições realizadas. A partir dos dados numéricos e experimentais, como esperado, verificou-se que quanto maior a dimensão da DGS-matrioska, menor é a frequência de ressonância e a largura de banda.

Com a utilização do ressonador dielétrico, a frequência de ressonância e a largura de banda dos filtros DGSs-matrioska diminuem, obtendo os menores valores quando o ressonador dielétrico é aplicado na quina da DGS. Na DGS1, por exemplo, a redução da frequência de ressonância, 75%, foi maior quando o DR estava na quina da DGS, já com o DR no centro a redução é de 56% com o DR no centro. Na largura de banda, a redução foi de 95% com o DR na quina da estrutura e de 84% com o DR no centro.

A análise da densidade de corrente dos DGS1 e DGS4, revelou que a redução mais significativa das frequências de ressonância e da largura de banda ocorre quando o DR é posicionado na quina. Isso se deve ao fato de que, nesta posição, o DR interagir de forma mais intensa com o campo.

Avaliando as dimensões do ressonador dielétrico aplicado nos filtros, observou-se que quanto maior é a dimensão do ressonador, menor é a resposta em frequência e a largura de banda obtidas. No DGS1, por exemplo, a frequência de ressonância e a largura de banda obtiveram a maior redução quando a dimensão do DR foi de $9 \times 9 \times 5$ (mm^3), sendo as reduções de 75% e de 95%, respectivamente. Quando a dimensão do DR é $1 \times 1 \times 1$ (mm^3), o DGS1 obtém as menores reduções, de 0,3% para a frequência de ressonância e de 0% para a largura de banda. No entanto, com o aumento das dimensões do ressonador, também ocorre o surgimento de ressonâncias secundárias na resposta em frequência dos filtros.

4.2. Sugestões e continuidade dos trabalhos

A aplicação de DR às estruturas baseadas na geometria matrioska é um tema novo e requer uma continuação. Entre as sugestões de continuidade deste trabalho, podem ser citadas:

- ✓ Análise da perda de inserção;
- ✓ Verificação experimental do efeito da redução das dimensões do DR;
- ✓ Aplicação do DR em filtros passa-faixa;
- ✓ Avaliar o efeito da utilização de DR em antenas;
- ✓ Utilização de DR em estruturas DGS em cascata.

TRABALHOS PUBLICADOS

Gomes Neto, A., Silva, J. C. e, Carvalho, J. N., Mamedes, D. F., Andrade, M. C., Costa, J. A., Compact Matryoshka DGS Using Dielectric Resonator. IEEE Acess, v. 12, p. 21947-21953, 2024.

Gomes Neto, A., Silva, J. C. e, Carvalho, J. N., Mamedes, D. F., Andrade, M. C., Costa, J. A., Miniaturização de uma DGS Baseada na Geometria Matrioska Utilizando um Ressonador Dielétrico. In: 16° Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2024, Goiânia, GO. Anais do 16° Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2024. p. 317-320.

Gomes Neto, A., Costa, J. A., Andrade, M. C., Henrique, R. L., Araujo, E. B., Cavalcante, G. A., Uma Nova Configuração de Filtro Passa-faixa baseado na Geometria Matrioska com Três Camadas de Metalização. In: 16° Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2024, Goiânia, GO. Anais do 16° Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2024. p. 371-374.

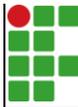
REFERÊNCIAS

- [1] A. E. HAJJ, "The impact of telecommunications on our society," *Insidetelecom – International Telecoms Business Magazine*, 28 Junho, 2022. Disponível em <https://insidetelecom.com/the-impact-of-telecommunications-on-our-society/>. Acesso em 02/10/2023.
- [2] M. E. MEENA, J. GENG, "Dynamic competition in telecommunications: A systematic literature review," in *SAGE Open*, v. 12, n. 2, pp. 1-10, 2022. <https://doi.org/10.1177/21582440221094609>. 2022. Disponível em <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/21582440221094609>. Acesso em 20/11/2023.
- [3] E. D. MENEZES, **Utilização de tecnologias digitais de informação e comunicação e preservação de recursos educacionais digitais produzidos durante o ensino remoto emergencial na área de saúde**, Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza, Ceará, 2022.
- [4] STATISTA. "Número de usuários de smartphones em todo o mundo," Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>. Acesso em 06 de mar. de 2023.
- [5] A. H. HUSSEIN, "Internet of things (IOT): Research challenges and future applications," in *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, v. 10, n. 6, 2019.
- [6] U. GUSTAVSSON, et al. "Implementation challenges and opportunities in beyond-5G and 6G communication," in *IEEE Journal of Microwaves*, v. 1, n. 1, pp. 86-100, 2021.
- [7] 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*, vol. 10, pp. 30792-30821, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3160215.
- [8] ITU. "Managing the radio-frequency spectrum for the world," Disponível em: <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/itu-r-managing-the-radio-frequency-spectrum-for-the-world.aspx>, Acesso em: 02 de out. de 2023.
- [9] 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.
- [10] R. A. GHEORGHIU, V. IORDACHE and I. BADESCU, "Analysis of possible Wi-Fi interferences of wireless communications implemented in vehicular environments," in *2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, 2017, pp. 244-247, doi: 10.1109/TELSKS.2017.8246273.
- [11] ANATEL. "Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de faixas de frequências no Brasil - PDF," Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2023/1834-resolucao-759>. Acesso em: 21 de Agosto de 2023.

- [12] ANATEL. “Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita,” Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>>. Acesso em: 21 de Agosto de 2023.
- [13] J. S. HONG, M. J. LANCASTER, **Microstrip Filters for RF Microwave Applications**. John Wiley & Sons, Inc. New York, 2001.
- [14] B. JITHA, **Development of Compact Microwave Filters Using Microstrip Loop Resonators**, PhD. Thesis, Cochin Universtiy of Science and Technology, Cochin, India, 2010
- [15] A. FLOR NETO, **Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska com Anéis Retangulares e Circulares**, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2020.
- [16] 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 MOMAG 2016, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 25–29 de julho, 2016, pp. 1-5.
- [17] J. G. de O. MARIANO, **Implementação de Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska**, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2017.
- [18] A. GOMES NETO, J. C. SILVA, I. B. G. COUTINHO, S. S. CAMILO FILHO, D. A. SANTOS, B. L. C. DE ALBUQUERQUE, “A Defected Ground Structure Based on Matryoshka Geometry,” *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 21, Nº. 2, 2022.
- [19] L. H. WENG, Y. C. GUO, X. W. SHI, X. Q. CHEN, “An Overview on Defected Ground Structure,” *Progress in Electromagnetics Research B*, Vol. 7, p. 173-189, 2008.
- [20] M. K. KHANDELWAL, B. K. KANAUIA, S. KUMAR, “Defected Ground Structure: Fundamentals, Analysis, and Applications in Modern Wireless Trends”, *International Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2017, 2017.
- [21] J. ZHOU, Y. RAO, D. YANG, H. J. QIAN, X. LUO, “Compact wideband BPF with wide stopband using substrate integrated defected ground structure,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 31, n. 4, p. 353-356, 2021.
- [22] Y. RAO, H. J. QIAN, B. YANG, R. GÓMEZ-GARCÍA and X. LUO, "Dual-Band Bandpass Filter and Filtering Power Divider with Ultra-Wide Upper Stopband Using Hybrid Microstrip/DGS Dual-Resonance Cells," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23624-23637, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970209.
- [23] F. A. A. D. SOUZA, A. L. P. D. S. CAMPOS, A. GOMES NETO, A. J. R. SERRES, C. C. R. D. 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*, v. 19, p. 214-227, 2020.

- [24] I. KHAN, Q. WU, I. ULLAH, S. U. RAHMAN, H. ULLAH, K. ZHANG, "Designed circularly polarized two-port microstrip MIMO antenna for WLAN applications," *Applied Sciences*, v. 12, n. 3, p. 1068, 2022.
- [25] S. SALEH, W. ISMAIL, I. S. ZAINAL ABIDIN, M. H. JAMALUDDIN, S. A. AL-GAILANI, A. S. ALZOUBI, M. H. BATAINEH, "Compact UWB 1: 2: 1 unequal-split 3-way bagley power divider using non-uniform transmission lines," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, v. 35, n. 2, p. 262-276, 2021.
- [26] S. ZARGHAMI, M. HAYATI, "Narrow-band power dividers with wide range tunable power-dividing ratio," *Scientific Reports*, v. 12, n. 1, p. 17351, 2022.
- [27] E. MANSOUR, A. ALLAM, A. B. ABDEL-RAHMAN, "A novel approach to non-invasive blood glucose sensing based on a defected ground structure," In: 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2021. p. 1-5.
- [28] J. G. OLIVEIRA, J. G. D. JUNIOR, E. N. PINTO, V. P. S. NETO, A. G. D'ASSUNÇÃO, "A new planar microwave sensor for building materials complex permittivity characterization," *Sensors*, v. 20, n. 21, p. 6328, 2020.
- [29] K. DAUTOV, M. HASHMI, G. NAURYZBAYEV, N. NASIMUDDIN, "Recent advancements in defected ground structure-based near-field wireless power transfer systems," *IEEE access*, v. 8, p. 81298-81309, 2020.
- [30] M. M. EL-NEGM, H. A. ATALLAH, A. B. ABDEL-RAHMAN, "Compact 500 MHz Coupled Resonators Design Analyzed by J-Inverters for Wireless Power Transfer (WPT) Utilization," *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, v. 2, n. 2, p. 70-75, 2020.
- [31] S. VIEGA, "Qual é a história das matrioskas, as bonecas russas?," Disponível em: <<https://educacao.umcomo.com.br/artigo/qual-e-a-historia-das-matrioskas-as-bonecas-russas-6266.html>>. Acesso em 23 de agosto de 2023.
- [32] A. GOMES NETO, A. G. DASSUNÇÃO, J. C. e. SILVA, A. N. da SILVA, H. D. P. A. FERREIRA and I. S. S. LIMA, "A proposed geometry for multi-resonant frequency selective surfaces," *2014 44th European Microwave Conference*, Rome, 2014, pp. 897-900. doi: 10.1109/EuMC.2014.6986580
- [33] H. de P. A. FERREIRA. **MATRIOSKA: UMA PROPOSTA DE GEOMETRIA PARA FSS MULTIBANDAS**, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2014.
- [34] D. A. SANTOS. **FILTROS DGSs BASEADOS NA GEOMETRIA MATRIOSKA**, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2023.
- [35] W. G. da. SILVA, **Miniaturização de antenas de microfita para aplicações em CubeSats**, Tese de Doutorado, UFRN, Natal, RN, Brasil, 2021.
- [36] J. N. B. de. SALES, **Desenvolvimento e caracterização de cerâmicas de dióxido de titânio dopadas com nióbio e lantânio**, Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil, 2022.

- [37] S. K. dos S. de. QUEIROZ, **Análise das propriedades dielétricas e da estabilidade térmica da matriz compósita $FeNbO_4$ (fno)- $CaTiO_3$ (cto) para uso em antenas ressoadoras dielétricas**, Dissertação de Mestrado, UFERSA, Mossoró, RN, Brasil, 2021.
- [38] E. TEMEX. “Dielectric Resonators,” Disponível em: <<https://exxelia.com/uploads/PDF/e7000-v1.pdf>>. Acesso em: 01 de Novembro de 2023.
- [39] Trans-Tech, “Products for RF/Microwave Applications,” Disponível em: <<https://datasheet.octopart.com/SR9000SPQ0472AY-Trans-Tech-datasheet-8861441.pdf>>. Acesso em: 26 de Dezembro de 2023.
- [40] Ansys HFSS Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2024.
- [41] E5071C, Analisador de redes datasheet. Disponível em: <<https://www.keysight.com/br/pt/assets/7018-01424/data-sheets/5989-5479.pdf>> Acesso em 31 de maio de 2024.
- [42] C. A. DESOER, E. S. KUH, **Teoria Básica de Circuitos**, Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, 1979.
- [43] S. N. Filho, **Filtros seletores de sinais**. 3ª ed. Florianópolis, SC. Ed. da UFSC, 2010.
- [44] R. A. A. NUNES, et al. "Introdução a Processadores de Sinais Digitais-DSP." *Apostila Da CBPF, Rio De Janeiro* (2006).
- [45] D. M. POZAR, **Microwave Engineering**, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2012.
- [46] Filtro RLC. Disponível em: <https://m.media-amazon.com/images/I/51VSY9ouaOL._AC_SX679_.jpg> . Acesso em: 14/10/2024.
- [47] Filtro passa-faixa. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Electrical-response-of-band-pass-filter-for-Wimax-applications-predicted-by-the-new_fig1_281637577>. Acesso em: 14/10/2024.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, Joao Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Versão Final da Dissertação

Assunto:	Versão Final da Dissertação
Assinado por:	Mylenna Andrade
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Mylenna Correia de Andrade, DISCENTE (20221630011) DE Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica - João Pessoa**, em 30/12/2024 21:45:03.

Este documento foi armazenado no SUAP em 30/12/2024. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1351977

Código de Autenticação: d817a838c6

