



Igor Karsten Barbosa de Medeiros

**FILTRO REJEITA-FAIXA COMPACTO ASSOCIANDO
DGS-MATRIOSKA DE ANEL ABERTO E RESSONADOR
DIELÉTRICO**

Orientador: Alfrêdo Gomes Neto, Dr.
Coorientador: Adaildo Gomes D'Assunção Junior, Dr.

João Pessoa - PB
2025

Igor Karsten Barbosa de Medeiros

**FILTRO REJEITA-FAIXA COMPACTO ASSOCIANDO
DGS-MATRIOSKA DE ANEL ABERTO E 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

Coorientador: Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção Junior

João Pessoa – PB
2025

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

M488f	Medeiros, Igor Karsten Barbosa de. Filtro rejeita-faixa compacto associando DGS-matrioska de anel aberto e ressonador dielétrico / Igor Karsten Barbosa de Medeiros. - 2025. 93 f. : il. Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2025. Orientação: Profº. Dr. Alfrêdo Gomes Neto. Coorientação: Profº. Dr Adaildo Gomes D’Assunção Junior. 1.DGS - matrioska. 2. Filtro. 3. LBO. 4. Ressonador dielé- trico. 5. Seletividade. I. Título CDU 621.3.018.4(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

IGOR KARSTEN BARBOSA DE MEDEIROS
MATRÍCULA 20231630007

**FILTRO REJEITA-FAIXA COMPACTO ASSOCIANDO DGS-MATRIOSKA DE ANEL ABERTO E
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 18 de junho de 2025.

Membros da Banca Examinadora:

Dr. Alfrêdo Gomes Neto
IFPB (Orientador)

Dr. Adaildo Gomes DAssunção Júnior
IFPB (Coorientador)

Dr. Jefferson Costa e Silva
IFPB (Examinador Interno)

Dr. Gustavo Araujo Cavalcante
IFPB (Examinador interno)

Dr. Alexandre Jean René Serres
UFCG (Examinador externo).

João Pessoa/2025

Documento assinado eletronicamente por:

- **Alfredo Gomes Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/06/2025 15:46:49.
- **Jefferson Costa e Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/06/2025 15:51:27.
- **Gustavo Araujo Cavalcante**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/06/2025 18:06:19.
- **Adaildo Gomes D Assuncao Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/06/2025 18:27:36.
- **Alexandre Jean René Serres**, PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL, em 19/07/2025 09:37:08.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/05/2025. 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 720896
Verificador: 79c22b46e9
Código de Autenticação:



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

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a Deus, e aos meus pais, por acreditarem em mim e me impulsionarem a buscar meus objetivos. A vocês a minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, por me permitir chegar até aqui, por ter me concedido força e sabedoria, para ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus pais, por todo apoio e compreensão, sempre dispostos a me ouvir e me encorajar a continuar e me manter firme na caminhada.

Aos professores Alfrêdo e Adaildo, por terem sido meus orientadores e por toda paciência e compreensão e apoio foram essenciais para guiar o meu aprendizado.

A todos os colegas do mestrado, amigos e familiares, pelo apoio e participação, direta ou indiretamente desta pesquisa e por todo o incentivo ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

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

EPÍGRAFE

RESUMO

Nesta pesquisa é apresentado um filtro rejeita-faixa compacto em uma estrutura com defeito no plano terra, DGS (*defected ground structure*), baseada na geometria matrioska de anel aberto associado a um ressonador dielétrico, DR (*dielectric resonator*). A geometria matrioska é descrita, incluindo as equações iniciais de projeto. Como ressonador dielétrico foi utilizada uma cerâmica de permissividade 115 (MCT-115). Para verificar as características de miniaturização, seletividade e variação da resposta em frequência, foram fabricados e caracterizados quatro filtros DGS-matrioska de anel aberto com dimensões diferentes. Os resultados numéricos e experimentais apresentaram uma boa concordância, onde foram consideradas quatro situações, sendo uma delas sem a presença do DR, e as outras três com o DR em diferentes posições (centro, quina e fenda). Quando comparadas às DGSs sem a presença do DR, observou-se que com o DR posicionado na quina e na fenda obteve-se uma maior redução na frequência de ressonância, até 58,97%, e uma redução na largura de banda de até 86,67%. A análise de densidade de corrente, possibilitou a visualização da interação do DR com os campos eletromagnéticos, onde através dessa análise, validou-se que as situações com DR posicionado na quina e fenda, apresentaram maior interação, justificando a redução nas frequências de ressonância. Quando comparadas às DGS-matrioska de anel fechado, observou-se que as DGS-matrioska de anel fechado apresentaram maior variação na frequência de ressonância e largura de banda para situação com DR posicionado na quina, de forma similar a DGS-matrioska de anel aberto. Também se observou que as DGS-matrioska de anel fechado apresentaram maior variação na frequência de ressonância e largura de banda, quando comparadas a situação sem a presença do DR, apresentando uma redução na frequência de ressonância de até 80% e uma redução na largura de banda de até 94%. No entanto a DGS-matrioska de anel aberto apresentou maior variação na largura de banda de operação (LBO). De maneira geral, os resultados numéricos e experimentais obtidos apresentaram uma boa concordância, permitindo variação na frequência de ressonância, o que caracteriza a possibilidade de miniaturização e versatilidade para aplicação em projetos de telecomunicações.

Palavras-chave: DGS-matrioska, filtro, LBO, ressonador dielétrico, seletividade.

ABSTRACT

This research presents a compact band-reject filter in a defected ground structure (DGS), based on the matrioska geometry of an open and closed ring associated with a dielectric resonator (DR). The matrioska geometry is described, including the initial design equations. A 115 permittivity ceramic (MCT-115) was used as the dielectric resonator. In order to verify the characteristics of miniaturization, selectivity and frequency response variation, four open-ring DGS-matryoshka filters with different dimensions were manufactured and characterized. The numerical and experimental results showed good agreement, where four situations were considered, one without the presence of the DR, and the other three with the DR in different positions (center, corner and gap). When compared to the DGSs without the presence of DR, it was observed that with the DR positioned in the corner and in the gap a greater reduction in the resonance frequency was achieved, up to 58.97% and a reduction in bandwidth of up to 86.67%. The current density analysis made it possible to visualize the iteration of the DR with the electromagnetic fields, where this analysis validated that the situations for the DR positioned in the corner and gap showed greater iteration with the electromagnetic fields, justifying the observed reduction in the resonance frequencies. When compared to the closed-ring DGS-matryoshka, it was observed that the closed-ring DGS-matryoshka showed greater variation in resonance frequency and bandwidth for the situation with DR positioned in the corner, similarly to the open-ring DGS-matryoshka. It was also observed that the closed-ring DGS-matryoshka showed greater variation in resonance frequency and bandwidth when compared to the situation without the presence of the DR, with a reduction in resonance frequency of up to 80% and a reduction in bandwidth of up to 94%. However, the open-ring DGS-matryoshka showed greater variation in operating bandwidth (LBO). In general, the numerical and experimental results obtained were in good agreement, allowing for variation in the resonance frequency, which characterizes the possibility of miniaturization and versatility for application in telecommunications projects.

Keywords: DGS-matryoshka, filter, LBO, dielectric resonator, selectivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de filtro rejeita-faixa suprimindo um sinal indesejado [8].....	19
Figura 2 – Exemplo de geometria matrioska, adaptado de [8].....	19
Figura 3 – Exemplo de boneca matrioska [10].....	20
Figura 4 – Exemplos de geometria matrioska.....	20
Figura 5 - Exemplo de DGS-matrioska com ressonador dielétrico.....	21
Figura 6 – DGS-matrioska com anel aberto associado ao ressonador dielétrico.....	22
Figura 7 – Componentes passivos [18].....	24
Figura 8 – Componentes ativos – transistores e amplificadores operacionais [18].	24
Figura 9 – Princípio de funcionamento de um filtro digital [22].....	25
Figura 10 – Filtro com componentes concentrados [22].....	26
Figura 11 – Filtro com componentes distribuídos.....	26
Figura 12 – Respostas em frequência de filtros ideais [18].....	26
Figura 13 – Exemplo de resposta em frequência filtro passa-baixa [18].....	27
Figura 14 – Exemplo de resposta em frequência de um filtro passa-altas [18].....	28
Figura 15 – Resposta em frequência filtro passa-faixa [18].....	29
Figura 16 – Resposta em frequência filtro rejeita-faixa [18].....	29
Figura 17 – Estrutura geral de um ressonador de microfita.....	30
Figura 18 – Exemplos de configurações de ressonadores [14].....	31
Figura 19 – Exemplos de geometrias DGSs.....	32
Figura 20 – Geometria DGS-matrioska [36].....	33
Figura 21 – Geometria matrioska passo a passo.....	34
Figura 22 - Geometria matrioska com dois anéis concêntricos [9].....	35
Figura 23 - Geometria matrioska com três anéis concêntricos.....	35
Figura 24 - Geometria matrioska com anel aberto.....	36
Figura 25 – Resposta em frequência típica de um ressonador com dois ou mais anéis matrioska.....	38
Figura 26 – Dimensões do filtro DGS matrioska de anel aberto.....	40
Figura 27 – Posição do dielétrico no plano xy [36].....	42
Figura 28 – Configuração da caracterização experimental.....	43
Figura 29 – Resposta em frequência da DGS1 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR no centro da DGS (vista inferior).....	44
Figura 30 – Resposta em frequência da DGS1 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na quina da DGS (vista inferior).....	45
Figura 31 – Resposta em frequência da DGS1 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na fenda da DGS (vista inferior).....	46
Figura 32 – Resposta em frequência da DGS2 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR no centro da DGS (vista inferior).....	48

Figura 33 – Resposta em frequência da DGS2 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na quina da DGS (vista inferior).....	49
Figura 34 – Resposta em frequência da DGS2 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na fenda da DGS (vista inferior).....	50
Figura 35 – Resposta em frequência da DGS3 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR no centro da DGS (vista inferior).....	52
Figura 36 – Resposta em frequência da DGS3 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na quina da DGS (vista inferior).....	53
Figura 37 – Resposta em frequência da DGS3 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na fenda da DGS (vista inferior).....	54
Figura 38 – Resposta em frequência da DGS4 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR no centro da DGS (vista inferior).....	56
Figura 39 – Resposta em frequência da DGS4 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na quina da DGS (vista inferior).....	57
Figura 40 – Resposta em frequência da DGS4 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na fenda da DGS (vista inferior).....	58
Figura 41 –Variação da frequência de ressonância em função da posição (dpx, dpy) do DR na DGS1.....	62
Figura 42 –Variação da frequência de ressonância em função da posição (dpx, dpy) do DR na DGS3.....	63
Figura 43 – Densidade de corrente da DGS1 sem a presença do DR.....	65
Figura 44 – Densidade de corrente da DGS1 com DR posicionado no centro.....	65
Figura 45 – Densidade de corrente da DGS1 com DR posicionado na quina.....	65
Figura 46 – Densidade de corrente da DGS1 com DR posicionado na fenda.....	66
Figura 47 – Densidade de corrente da DGS4 sem a presença do DR.....	66
Figura 48 – Densidade de corrente da DGS4 com DR posicionado no centro.....	66
Figura 49 – Densidade de corrente da DGS4 com DR posicionado na quina.....	67
Figura 50 – Densidade de corrente da DGS4 com DR posicionado na fenda.....	67
Figura 51 – Resposta em frequência das DGSs1 de anel fechado e aberto com DR no centro.....	71
Figura 52 – Resposta em frequência das DGSs2 de anel fechado e aberto com DR no centro.....	73
Figura 53 – Resposta em frequência das DGSs3 de anel fechado e aberto com DR no centro.....	74
Figura 54 – Resposta em frequência das DGSs4 de anel fechado e aberto com DR no centro.....	75

Figura 55 – Resposta em frequência das DGSs1 de anel fechado e aberto com DR na quina.....	78
Figura 56 – Resposta em frequência das DGSs2 de anel fechado e aberto com DR na quina.....	79
Figura 57 – Resposta em frequência das DGSs3 de anel fechado e aberto com DR na quina.....	80
Figura 58 – Resposta em frequência das DGSs4 de anel fechado e aberto com DR na quina.....	82
Figura 59 – Resposta em frequência DGS1 com DR na fenda com largura de banda de operação.....	84
Figura 60 – Resposta em frequência DGS2 com DR na fenda com largura de banda de operação.....	85
Figura 61 – Resposta em frequência DGS3 com DR na fenda com largura de banda de operação.....	85
Figura 62 – Resposta em frequência DGS4 com DR na fenda com largura de banda de operação.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensionamento das DGSs (em mm).....	41
Tabela 2 – Resumo dos resultados obtidos para DGS1.....	47
Tabela 3 – Resumo dos resultados obtidos para DGS2.....	51
Tabela 4 – Resumo dos resultados obtidos para DGS3.....	55
Tabela 5 – Resumo dos resultados obtidos para DGS4.....	59
Tabela 6 – Resultados para DGS sem DR.....	59
Tabela 7 – Resultados para as DGSs com DR no centro.....	60
Tabela 8 – Resultados para as DGSs com DR na quina.....	60
Tabela 9 – Resultados para as DGSs com DR na fenda.....	61
Tabela 10 – Resultados para as DGSs de anel fechado e DGSs de anel aberto sem DR.....	70
Tabela 11 – Resultados para as DGSs de anel fechado e anel aberto, com DR no centro.....	76
Tabela 12 – Resultados para as DGSs de anel fechado e anel aberto, com DR na quina.....	83
Tabela 13 – Resultados para as DGSs de anel aberto, com DR na fenda.....	86

LISTA DE SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
PDFF	Plano de Atribuição, Destinação, e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil
ITU	<i>Internacional 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> , Estrutura com Defeito no Plano Terra
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i> , Superfície Seletiva em Frequência
PBG	<i>Photonic Band Gap</i>
EBG	<i>Eletromagnetic Band Gap</i>
AL	Atenuação Livre
BW	<i>Band Width</i> , Largura de Banda
LBO	Largura de Banda de Operação

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
$f_{rmédia}$	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	18
1.1. Contextualização	18
1.2. Objetivos	22
1.2.1. Objetivo Geral	22
1.2.2. Objetivos Específicos	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1. Teoria e classificação dos filtros	24
2.1.1. Filtro passa-baixas (FPB)	27
2.1.2. Filtro passa-altas (FPA)	28
2.1.3. Filtro passa-faixa (FPF)	28
2.1.4. Filtro rejeita-faixa (FRF)	29
2.2. Ressonadores planares	29
2.3. Estrutura DGS	31
2.4. Geometria Matrioska	33
2.5. Ressonador Dielétrico	36
2.5.1. Frequência de Ressonância (f_r)	37
2.5.2. Constante Dielétrica (ϵ_r)	37
2.5.3. Fator de Qualidade (Q)	37
2.5.4. Coeficiente de Temperatura na Frequência de Ressonância (tf)	38
2.6. Parâmetros de Análise dos Filtros	38
3. RESULTADOS OBTIDOS	40
3.1. Filtro DGS-Matrioska de anel aberto com DR em diferentes posições (dpx, dpy): resultados numéricos e experimentais	42
3.2. Análise do Efeito na Resposta em Frequência da Posição do DR DGS-matrioska de Anel Aberto	61
3.3. Análise da Densidade de Corrente dos Filtros DGS-matrioska de anel aberto	64
3.3.1. Densidade de corrente da DGS1	64
3.3.2. Densidade de corrente da DGS4	66
4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE A DGS-MATRIOSKA DE ANEL ABERTO E DGS-MATRIOSKA DE ANEL FECHADO	68
4.1. DGSs-matrioska sem a presença do DR	68
4.2. DGSs-matrioska com DR posicionado no centro	70

4.3.	DGSs-matrioska com DR posicionado na quina	77
4.4.	DGSs-matrioska com DR posicionado na fenda	83
5.	CONCLUSÃO	87
5.1.	Considerações finais	87
5.2.	Sugestão e continuidade dos trabalhos	88
TRABALHO PUBLICADO		90
REFERÊNCIAS		91

1. INTRODUÇÃO

A introdução deste capítulo está organizada em duas seções. A primeira oferece uma contextualização concisa do tema, enquanto a segunda apresenta os objetivos desta dissertação.

1.1.Contextualização

Ao longo dos anos, as tecnologias de comunicações vêm avançando continuamente. No entanto, com o advento das telecomunicações, em especial as comunicações móveis e suas inúmeras aplicações, a utilização das faixas de radiofrequências torna-se cada vez mais restrita por se tratar de um recurso limitado. Além disso, o uso do espectro eletromagnético possui um alto valor agregado, e deve ser feito da forma apropriada, sendo regulamentado no Brasil pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) [1]-[3].

Os equipamentos eletrônicos também evoluíram em conjunto com as telecomunicações, sendo um exemplo a ser citado, o *smartphone* que inicialmente só possuía a função de realizar ligações de voz. Atualmente é um equipamento que possibilita um leque de serviços em uma única plataforma, como por exemplo, acesso à Internet, relógio digital, serviços de *streaming*, fazer videochamadas, *bluetooth*, entre outros. Principalmente para as unidades móveis, se impõe a necessidade de desenvolvimento de dispositivos (filtros, antenas, circuladores etc.) com dimensões reduzidas, leves, baixo custo de fabricação, entre outras características [4]-[7].

Para que os serviços de telecomunicações estejam disponíveis simultaneamente para uma maior quantidade de usuários, e em quase todos os locais, é necessário evitar interferências indesejadas e otimizar a transmissão dos sinais desejados. Nesse contexto, a utilização de filtros de RF/micro-ondas tona-se indispensável em sistemas de telecomunicações, desempenhando um papel fundamental na seletividade da utilização das faixas de frequências, otimizando os sistemas para os quais foram projetados, como ilustra a Figura 1.

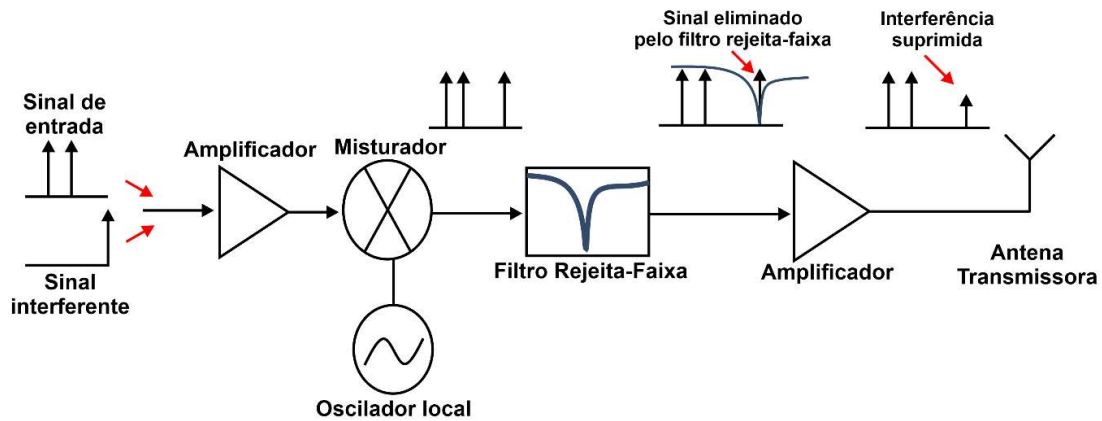


Figura 1 – Exemplo de filtro rejeita-faixa suprimindo um sinal indesejado [8].

O crescente desenvolvimento das telecomunicações, faz com que o mercado exija dispositivos com respostas em frequência específicas, dessa forma alavancando o desenvolvimento de novos filtros. O Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA), do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), vem realizando pesquisas em filtros planares com novas formas geométricas, os quais, mais recentemente se baseiam na geometria matrioska como defeito no plano terra, DGS (*Defected Ground Structure*), dessa forma sendo chamado de DGS-matrioska Figura 2 [8], [9].

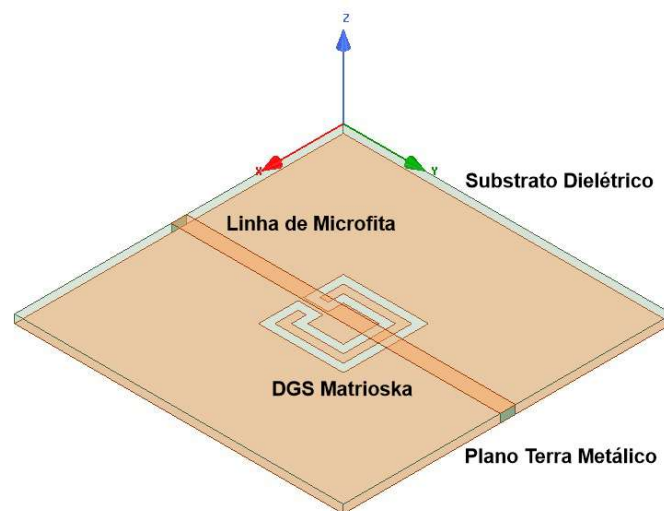


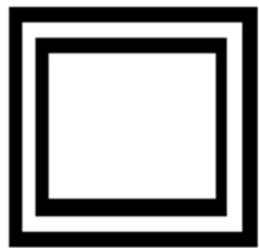
Figura 2 – Exemplo de DGS-matrioska, adaptado de [8].

A boneca matrioska, é um conjunto de bonecas, as quais possuem diferentes tamanhos e são dispostas uma dentro da outra, da maior, a qual ocupa o espaço mais externo, para menor, que ocupa o espaço mais interno. Dessa maneira, ao serem colocadas uma dentro da outra, ocupam apenas o volume da boneca mais externa, como ilustra a

Figura 3, [10]. Essa mesma ideia é adotada para geometria matrioska desenvolvida no GTEMA-IFPB, onde vários anéis são colocados de maneira concêntrica e interligados, aumentando o comprimento efetivo, sem aumentar a área ocupada, Figura 4.



Figura 3 – Exemplo de boneca matrioska [10].



a) dois anéis concêntricos



b) matrioska com três anéis concêntricos



c) matrioska com dois anéis concêntricos - aberto

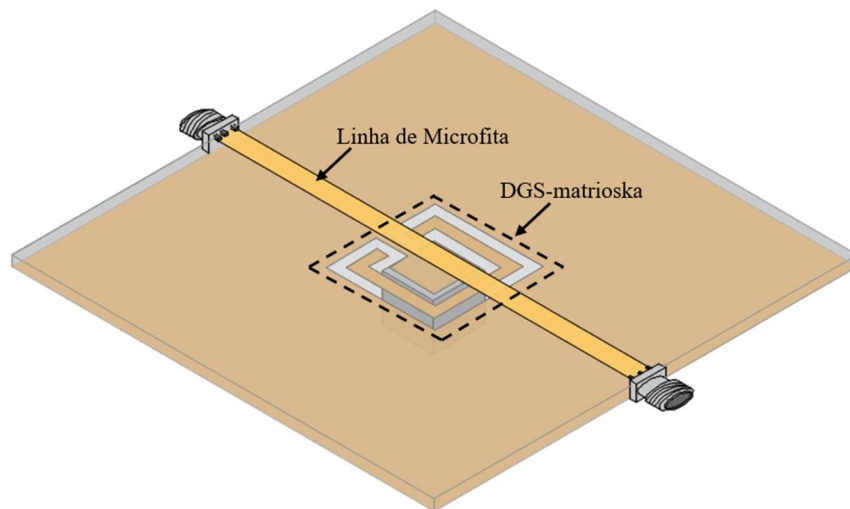


d) matrioska com três anéis concêntricos - aberto

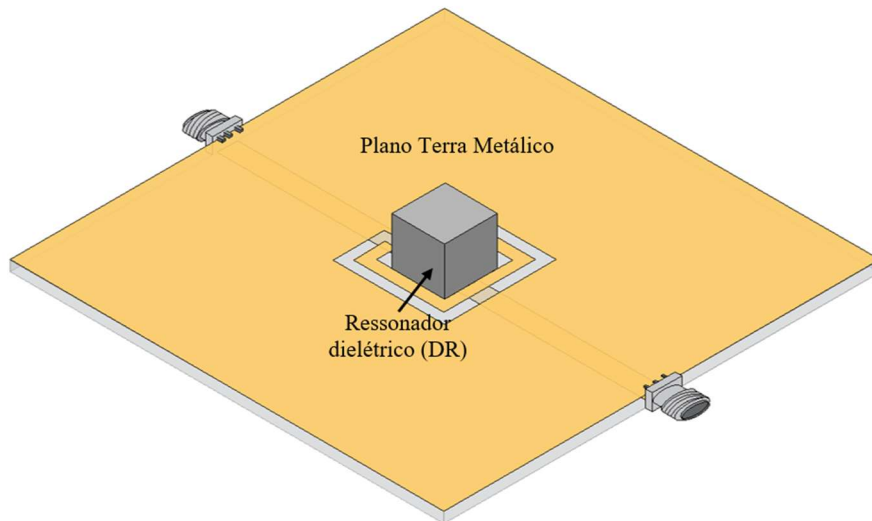
Figura 4 – Exemplos de anéis concêntricos e geometrias matrioska.

Fonte: Autor.

Em [11]-[13], foi apresentado uma DGS-matrioska associado a um ressonador dielétrico. Essa configuração, DGS-matrioska mais ressonador dielétrico, permitiu a obtenção de uma estrutura compacta e com resposta em frequência bastante seletiva, Figura 5.



a) Vista isométrica superior



b) Vista isométrica inferior



c) Vista lateral

Figura 5 - Exemplo de DGS-matryoska com ressonador dielétrico.

Fonte: Autor.

Dando continuidade aos trabalhos de [11]-[13], nesta proposta de dissertação é investigada a utilização da DGS-matryoska de anel aberto, associado a um ressonador dielétrico, para obtenção de filtros rejeita-faixa, Figura 6. Desta forma, espera-se avaliar como a redução da frequência de ressonância observada para os filtros baseados na geometria matryoska de anel aberto, [9], é afetada pela presença do ressonador dielétrico na DGS-matryoska de anel aberto.

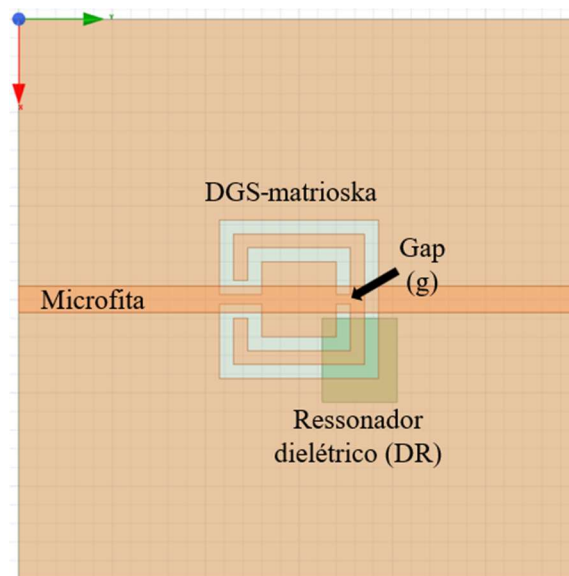


Figura 6 – DGS-matroska com anel aberto associado ao ressonador dielétrico.

Fonte: Autor.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo geral, desenvolver filtros rejeita-faixa compactos associando DGS-matroska de anel aberto e ressonador dielétrico.

1.2.2. Objetivos Específicos

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

- ✓ Revisar a bibliografia relacionada ao projeto, buscando compreender os seus conceitos básicos, em especial ao filtro rejeita-faixa;
- ✓ Compreender os princípios da geometria matroska;
- ✓ Compreender as principais características dos ressonadores dielétricos;
- ✓ Assimilar os princípios dos filtros DGS, enfatizando os filtros DGS-matroska de anel aberto;
- ✓ Avaliar os efeitos da associação de um ressonador dielétrico aos filtros DGS-matroska de anel aberto;
- ✓ Avaliar o efeito das diferentes posições do ressonador dielétrico na resposta em frequência do filtro proposto;

- ✓ Selecionar, projetar e caracterizar numericamente protótipos do filtro proposto;
- ✓ Fabricar e caracterizar experimentalmente os protótipos fabricados, comparando os resultados experimentais com os resultados numéricos;
- ✓ Comparar os filtros DGS-matrisoska com e sem anel aberto, quando associados ao ressonador dielétrico;
- ✓ Divulgar os resultados obtidos por meio da publicação de artigos em congressos e periódicos específicos da área;
- ✓ Elaborar e defender a dissertação do mestrado.

No capítulo seguinte são apresentados conceitos básicos que serão utilizados nesta dissertação.

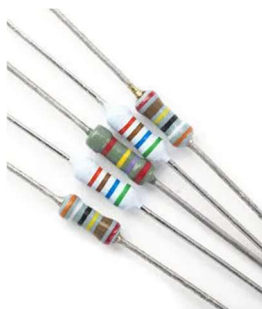
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os filtros são dispositivos fundamentais nos sistemas de telecomunicações, pois são responsáveis por separar os sinais de radiofrequência, com a finalidade principal de mitigar os efeitos indesejáveis de interferências e ruídos [14]. A seguir, são apresentados os fundamentos utilizados nesta dissertação de mestrado.

2.1. Teoria e classificação dos filtros

Dependendo da função, do tipo de tecnologia e componentes empregados na construção de um filtro, ele pode ser classificado como analógico ou digital [14], [15]. Além disso, os filtros analógicos podem ser classificados em filtros passivos e filtros ativos, os quais são descritos a seguir, [16], [17].

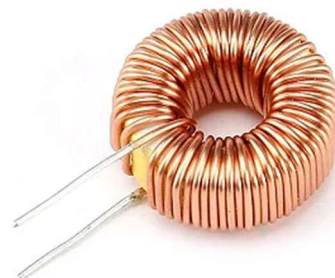
- Filtros passivos: são dispositivos confeccionados exclusivamente com elementos passivos (resistores, indutores e capacitores), Figura 7, os quais podem estar dispostos em arranjos em série e/ou paralelo, sendo esse arranjo definido de acordo com o tipo de projeto a ser aplicado



a) Resistores



b) Capacitores



c) Indutor

Figura 7 – Componentes passivos [18].

- Filtros ativos: são dispositivos projetados com elementos passivos associados a elementos ativos, por exemplo, transistores e amplificadores, Figura 8.



a) Transistores



b) Amplificadores operacionais

Figura 8 – Componentes ativos – transistores e amplificadores operacionais [18].

•Filtros digitais: são filtros que fazem a conversão do sinal analógico em digital e com isso processam digitalmente o sinal, Figura 9. Em geral, operam em dispositivos lógicos programáveis (hardwares) e/ou por meio de softwares [18], [19]. Este tipo de filtro possui pontos positivos, entre os quais se destacam: a possibilidade de construir filtros com ordens altas a depender do número de bits empregados, e a flexibilização de suas características por hardware e/ou software. No entanto, a depender do número de bits a ser aplicado no projeto e da taxa de amostragem, o seu custo pode aumentar devido à complexidade que o hardware deve possuir, uma vez que o sistema precisa de um conversor analógico/digital (A/D) no lado transmissor e do lado receptor um conversor digital/analógico (D/A).

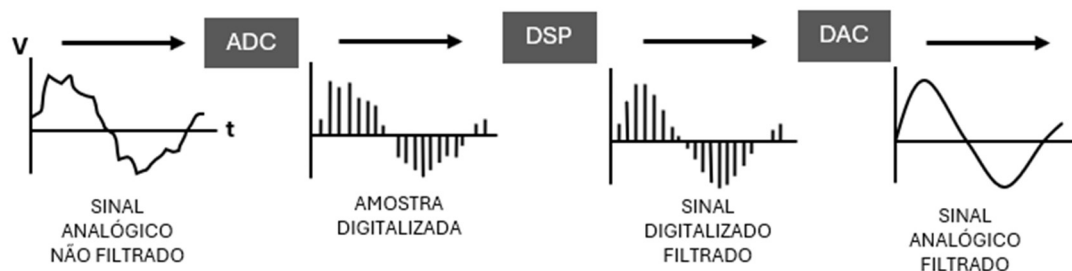


Figura 9 – Princípio de funcionamento de um filtro digital [22].

Os filtros também podem ser classificados relacionando suas dimensões, com o menor comprimento de onda guiada de operação. Dessa maneira, sendo constituídos por elementos concentrados ou distribuídos. Nos próximos tópicos é possível observar a definição dos filtros concentrados e distribuídos, mas não devem ser adotadas com rigidez, pois, os casos limites são analisados considerando características particulares [18], [20], [21].

•Filtros com componentes concentrados: são caracterizados por componentes discretos (resistores, capacitores, indutores, entre outros) onde suas dimensões são muito menores que o menor comprimento de onda guiado, ou seja, na máxima frequência para qual foram projetados. Uma aproximação adotada é $l_{m\acute{a}x} < \lambda/20$, onde $l_{m\acute{a}x}$ é a maior dimensão do filtro. Para esses filtros as leis de Kirchhoff das Tensões e Correntes e a lei de Ohm são aplicáveis [20], [21]. A Figura 10 ilustra um exemplo de um filtro com componentes concentrado.

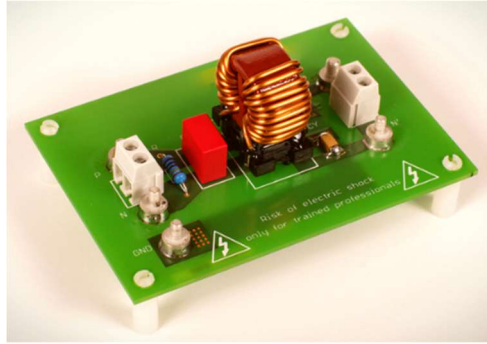


Figura 10 – Filtro com componentes concentrados [22].

•Filtros com componentes distribuídos: são filtros cujos componentes têm dimensões comparáveis ao menor comprimento de onda guiado, Figura 11. Em geral, esses filtros são analisados utilizando as equações de Maxwell [20], [21].

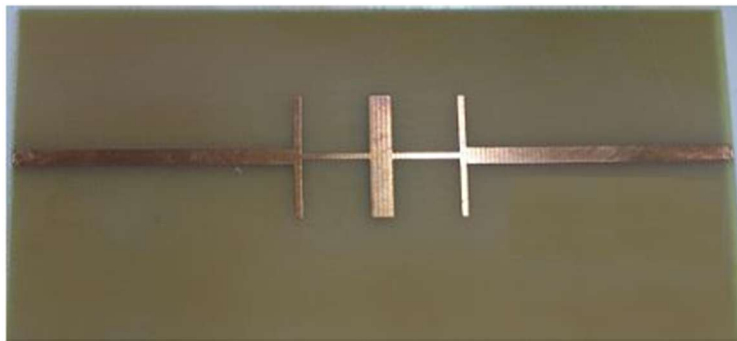
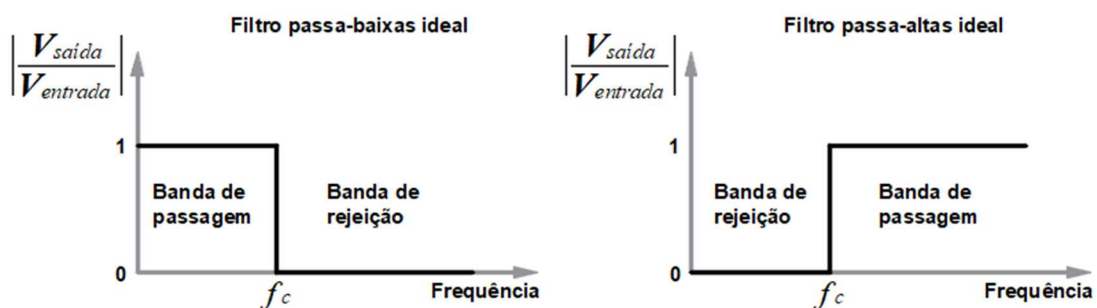


Figura 11 – Filtro com componentes distribuídos.

Fonte: Autor.

A depender de sua resposta em frequência, os filtros são usualmente classificados como: passa-baixas, passa-altas, rejeita-faixa e passa-faixa [19], [23]. A Figura 12 ilustra as respostas em frequência de cada filtro de forma ideal.



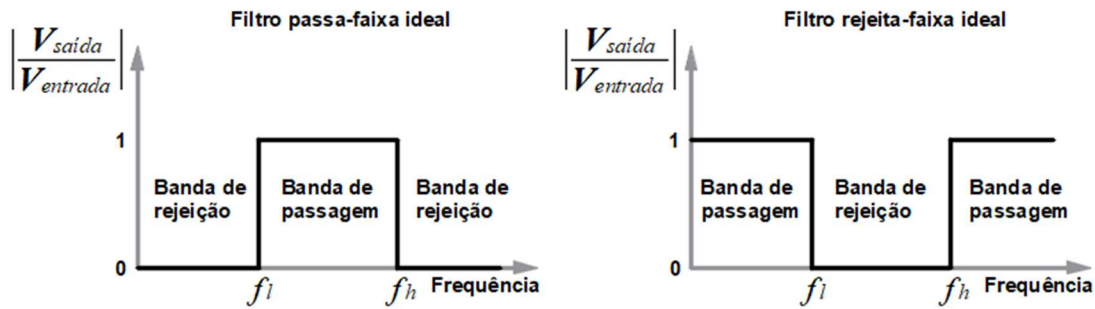


Figura 12 – Respostas em frequência de filtros ideais [18]

Considerando a resposta em frequência, os principais parâmetros dos filtros são: frequência de corte (f_c), frequência de corte inferior (f_l) e frequência de corte superior (f_h). Para os filtros ideais, as bandas de rejeição e passante são instantâneas. Entretanto, para os filtros reais, a passagem da banda de rejeição para a banda passante não é instantânea, isso se dá porque a resposta em frequência não apresenta uma seletividade em degrau, pois sua associação com componentes (resistores, indutores e capacitores) apresenta perdas e reatâncias as quais interferem na seletividade do filtro [18], [19], [23]. A seguir, considerando uma resposta em frequência real, é apresentada a classificação dos filtros.

2.1.1. Filtro passa-baixas (FPB)

São filtros responsáveis por permitir a passagem de sinais que possuam frequências abaixo da frequência de corte (f_{c2}), buscando dessa forma atenuar os sinais com frequências superiores às de corte [22]. A curva típica de resposta em frequência que ilustra um filtro passa-baixas pode ser visto na Figura 13 [19], [23].

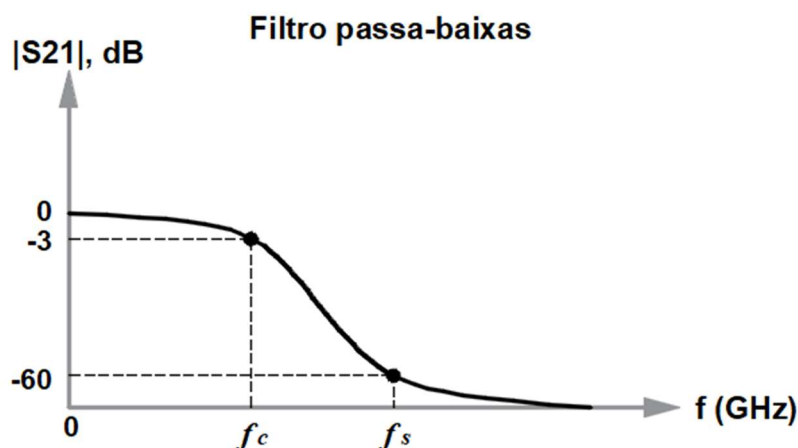


Figura 13 – Exemplo de resposta em frequência filtro passa-baixa [18].

Observando o gráfico da Figura 13, a frequência de corte (f_c) se trata da frequência para qual a potência do sinal de saída cai para a metade do máximo valor da potência do sinal de saída, ou ainda em dB, o sinal atenua 3dB, dessa maneira delimitando a largura de banda do sinal transmitido. Quando se trata de tensão do sinal, ao atenuar 3 dB, significa dizer que o sinal de saída equivale a aproximadamente 70,7% da tensão máxima de saída. A frequência de rejeição (f_s) é a frequência para qual o valor do $|S_{21}|$ atinge um determinado valor, especificado de acordo com a aplicação do projeto.

A região de transição é o intervalo entre as frequências de corte (f_c) e frequência de rejeição (f_s).

2.1.2. Filtro passa-altas (FPA)

São filtros responsáveis por permitir a passagem de frequências acima da frequência de corte (f_c), dessa forma atenuando os sinais abaixo da frequência de corte. A Figura 14 ilustra a curva típica de resposta em frequência de um filtro passa-altas [19], [23].

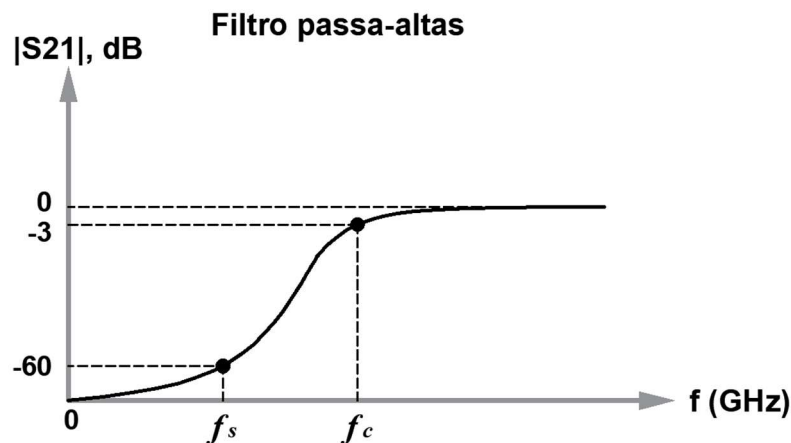


Figura 14 – Exemplo de resposta em frequência de um filtro passa-altas [18].

2.1.3. Filtro passa-faixa (FPF)

O filtro passa-faixa funciona selecionando uma determinada faixa de frequência, entre f_{c1} e f_{c2} , permitindo a passagem do sinal com a menor atenuação possível. Fora dessa faixa de frequência, o filtro atenua o sinal. A curva típica de resposta de frequência de um filtro passa-faixa, do ganho em função da frequência, é apresentada na Figura 15 [19], [23].

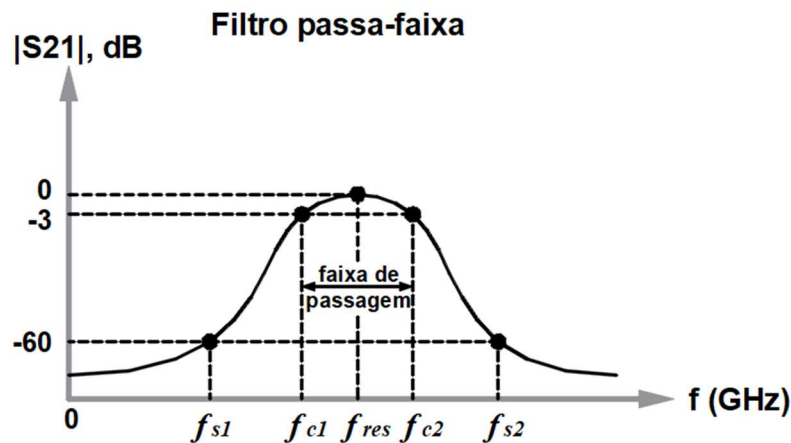


Figura 15 – Resposta em frequência filtro passa-faixa [18].

2.1.4. Filtro rejeita-faixa (FRF)

O filtro rejeita-faixa tem a função de atenuar o sinal em uma determinada faixa de frequência (f_{c1} e f_{c2}), deixando passar os sinais que estejam fora dessa faixa [19], [23]. Na Figura 16 é apresentada a resposta em frequência típica de um filtro rejeita-faixa.

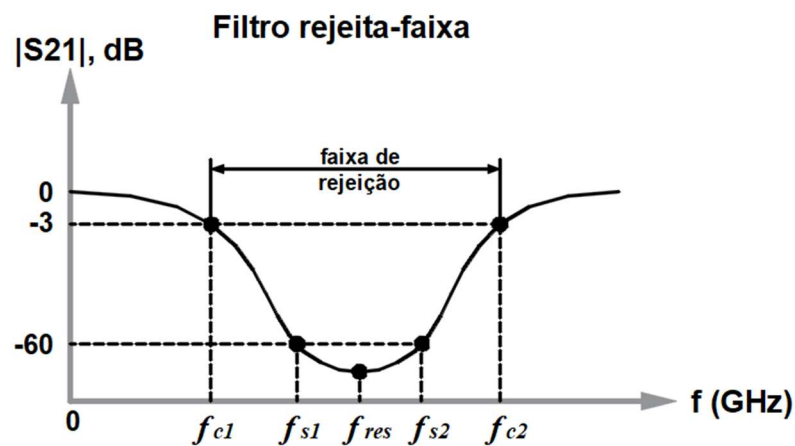


Figura 16 – Resposta em frequência filtro rejeita-faixa [18].

2.2. Ressonadores planares

Com o avançar das tecnologias telecomunicação é crescente a demanda por soluções para projetos de filtros de baixo custo de fabricação e com dimensões reduzidas, para aplicação em equipamentos de micro-ondas, em especial os equipamentos móveis [23]. Para essa demanda, uma tecnologia utilizada, é a de estruturas planares, que podem

ser fabricadas utilizando tecnologia de circuito impresso. Estruturas planares são estruturas que apresentam uma de suas dimensões é muito menor que o comprimento de onda guiado, sendo, em geral, essa dimensão a própria espessura do substrato dielétrico utilizado [18], [23]. Dessa maneira, os filtros concentrados ou semiconcentrados na forma planar são uma alternativa tecnológica bastante utilizada.

Ressonadores planares, são estruturas que servem para ressonar em frequências pré-definidas [14], [18], [23], [24]. Entre as diversas estruturas planares utilizadas para implementar os ressonadores, uma das mais comuns é a microfita, ilustrada na Figura 17, sendo composta por uma fita condutora de largura (w), comprimento (l), espessura da camada de metalização (t), permissividade relativa do substrato dielétrico (ϵ_r), espessura (h), e por fim em sua parte inferior um plano terra (condutor) [14], [18], [23].

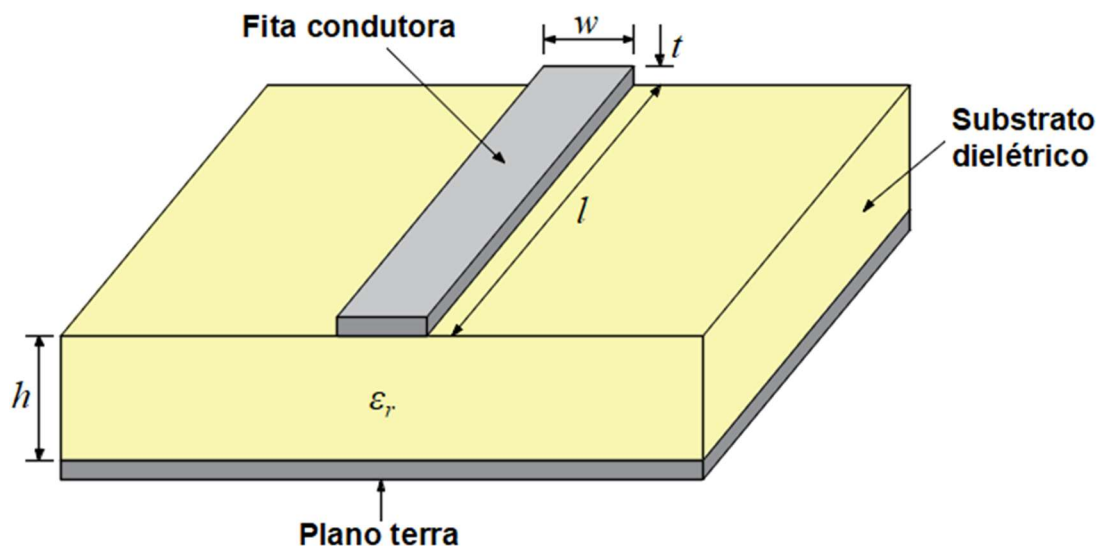


Figura 17 – Estrutura geral de uma microfita.

Fonte: Autor.

Ressonadores de microfita podem ser projetados e fabricados de inúmeras formas, e podem ser classificados como: ressonadores de elementos concentrados, elementos semiconcentrados, ressonadores de linha distribuída ou *patch* [14]. Os fatores que determinam qual tipo de ressonador de microfita utilizar são: técnica de fabricação, frequência de operação, qual tipo de filtro, bem como a perda máxima aceitável. A Figura 18 ilustra diferentes configurações de ressonadores.

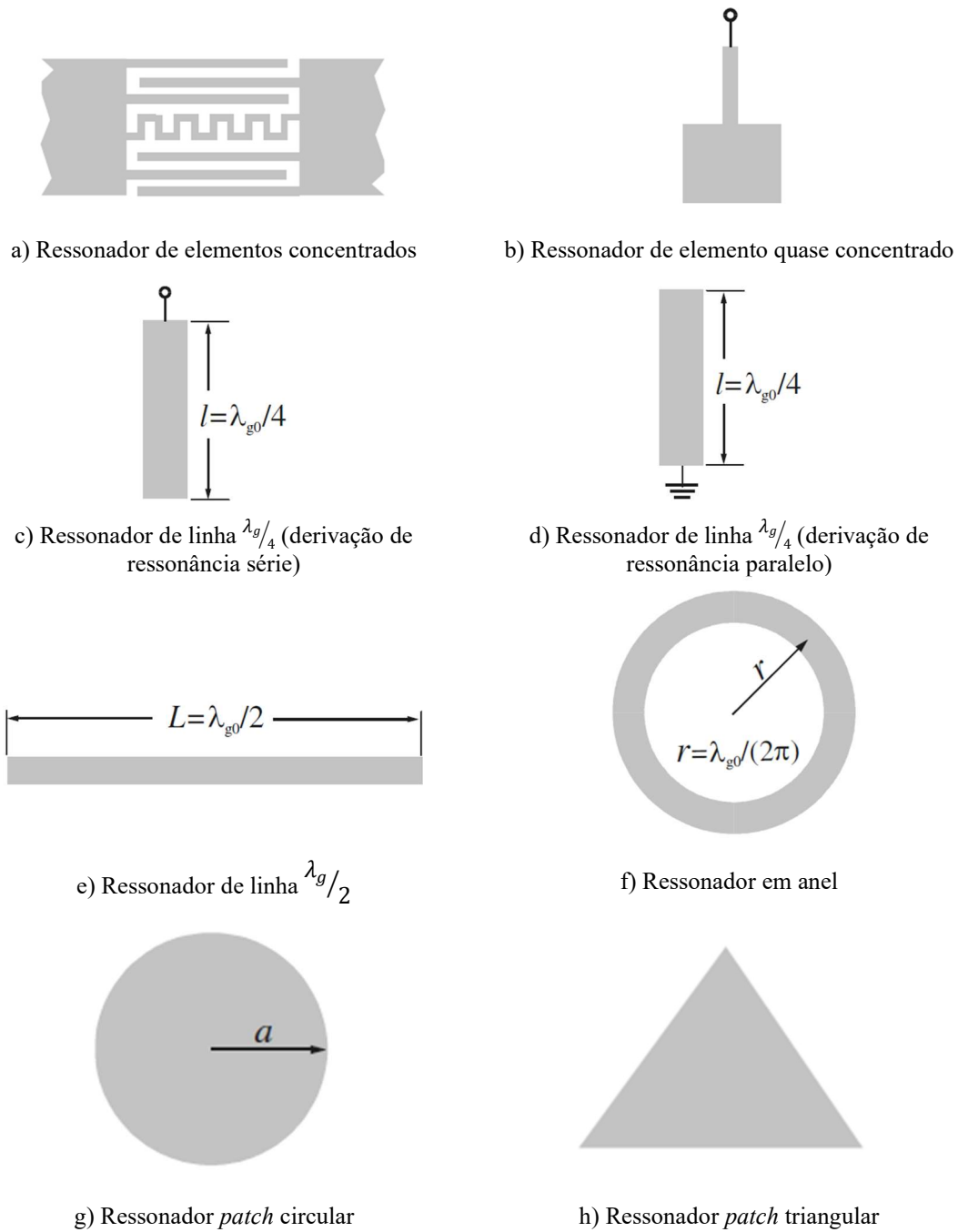


Figura 18 – Exemplos de configurações de ressonadores [14].

Neste trabalho, foi utilizada a configuração do tipo anel, na sua forma complementar, ou seja, a geometria é retirada do plano terra, com espiras quadradas concêntricas e interligadas, por sua vez, resultando na geometria matrisoska.

2.3.Estrutura DGS

A estrutura DGS é uma estrutura planar cuja sua principal característica é a modificação do seu plano terra por meio da remoção de uma pequena parte de sua camada

de metalização, modificando as características de uma linha de transmissão planar, como capacitância e indutância, o que possibilita o ajuste da sua resposta em frequência, sendo geralmente do tipo rejeita-faixa [9], [25].

A DGS possui geometrias variadas, algumas delas são: cabeça de espiral, ponta de flecha, forma de “H”, entre outras. Na Figura 19 é possível observar alguns exemplos conforme citadas, bem como outras variações da DGS.

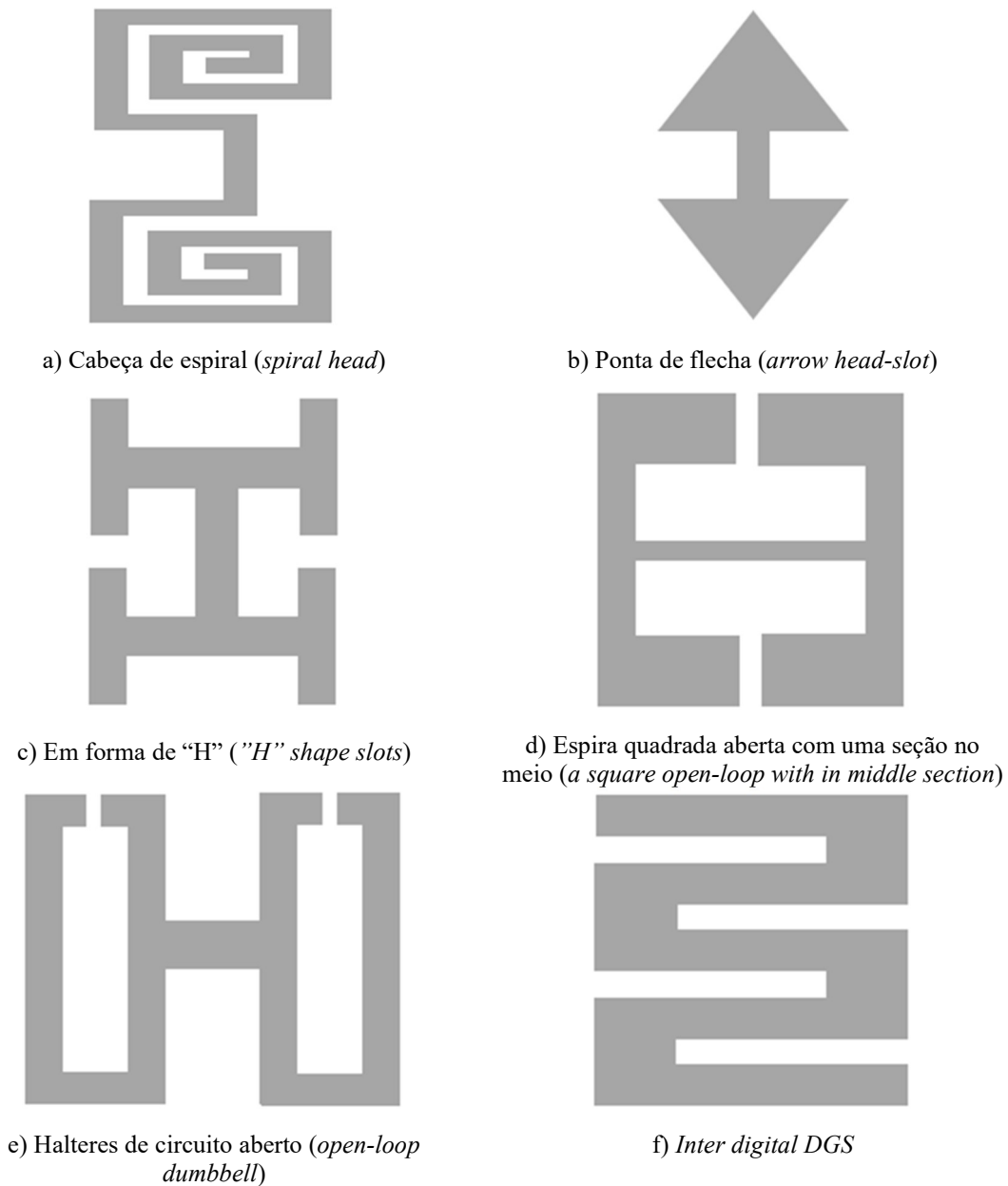


Figura 19 – Exemplos de geometrias DGSs.

Fonte: Autor.

A DGS-matrioska possibilita o aumento do comprimento efetivo, sem aumentar a área ocupada, sendo essa delimitada pela área do anel mais externo, Figura 20 [8], [9]. Essa característica favorece aplicações em RF e micro-ondas, caracterizando-se pela possibilidade de miniaturização, reduzida região de transição e operação em multibanda.

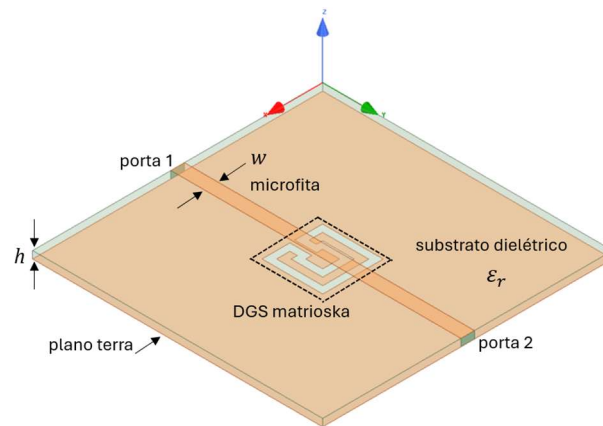


Figura 20 – Geometria DGS-matrioska [36].

2.4. Geometria Matrioska

A geometria matrioska baseia-se em anéis concêntricos interligados [26]. As suas características de miniaturização, seletividade e operação multibanda, a torna especialmente atrativa para aplicações em RF e micro-ondas, citando-se: superfícies seletivas em frequência (FSS) [27], [28], filtros [9], [29], DGS [8], [9], sensores [30], [31], entre outras aplicações.

Para ilustrar a obtenção da geometria matrioska, serão considerados apenas dois anéis concêntricos. Porém, caso sejam necessários mais anéis concêntricos, o procedimento é semelhante. Inicialmente, são projetados dois anéis concêntricos, Figura 21(a). Em seguida é aberta uma fenda na mesma posição dos dois anéis, Figura 21(b). Por fim, os anéis concêntricos são interligados formando o anel matrioska, como é possível visualizar na Figura 20(c). Caso se deseje um anel aberto, é inserida uma fenda, geralmente no anel mais interno, Figura 21(d).

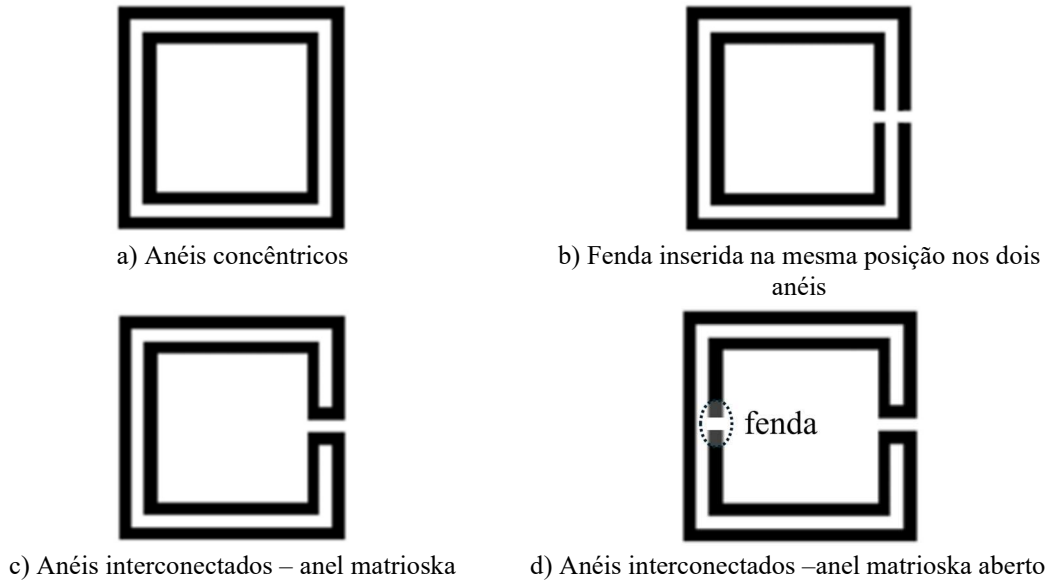


Figura 21 – Geometria matrioska passo a passo.

Fonte: Autor.

Observe-se que que, semelhante à geometria matrioska quando aplicada às superfícies seletivas em frequência, FSS, do tipo passa-faixa [26], [28], na DGS a geometria matrioska é removida uma camada de metalização do seu plano terra [8], [9].

Considerando anéis concêntricos quadrados, $w_{xmai} = w_{ymai} = w_{mai}$, com $i = 1, 2$, Figura 22, uma aproximação inicial da frequência de ressonância pode ser obtida a partir das seguintes equações:

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

sendo,

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

e,

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

O ϵ_{reff} é a permissividade relativa para linha de microfita, considerando um substrato com constante dielétrica ϵ_r , espessura h e largura w . O valor de ϵ_{reff} pode ser calculado utilizando programas computacionais, como por exemplo o AppCad disponível em [32], ou implementando diretamente as equações disponíveis, como, por exemplo, em [14]. Note que são consideradas duas larguras, uma da microfita, w , e outra do anel matrioska, w_{ma} . É importante destacar que as equações (1)-(3) são equações iniciais do

projeto, podendo serem utilizadas como uma etapa inicial de projeto, para uma posterior, se necessária, otimização numérica.

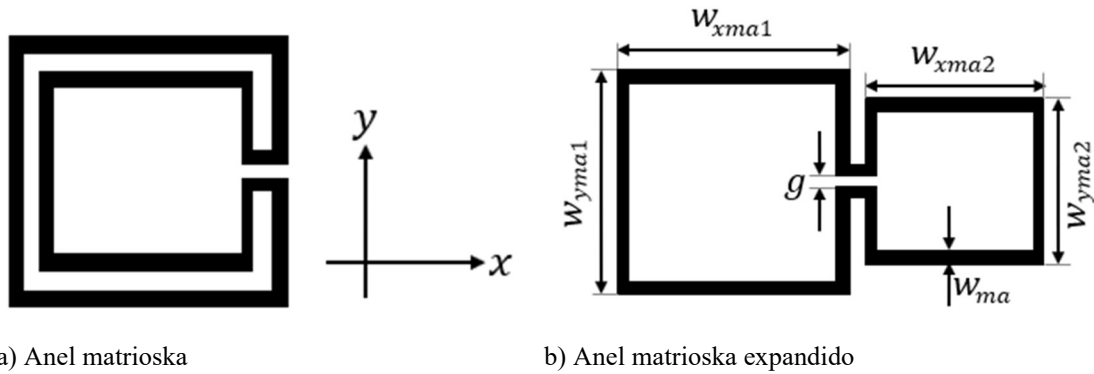


Figura 22 - Geometria matryoska com dois anéis concêntricos [9].

Para a geometria matryoska com três anéis concêntricos, Figura 23, (1) continua válida, porém, o L_{eff} é dado por (4):

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

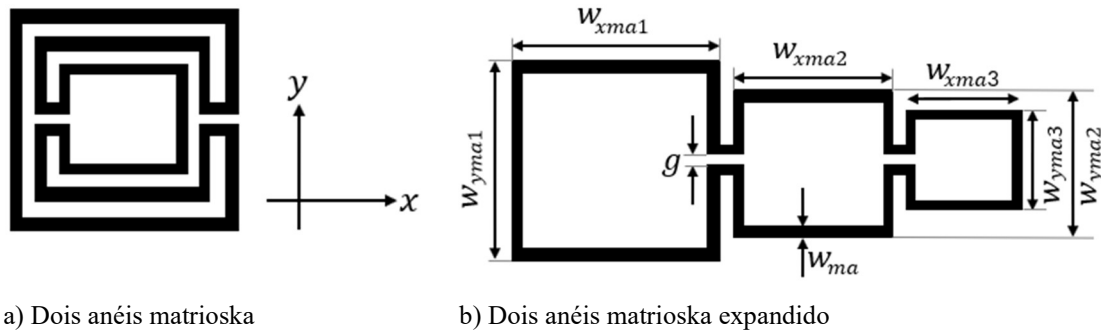
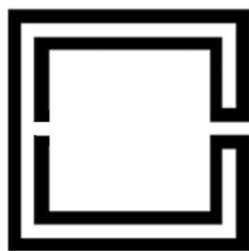


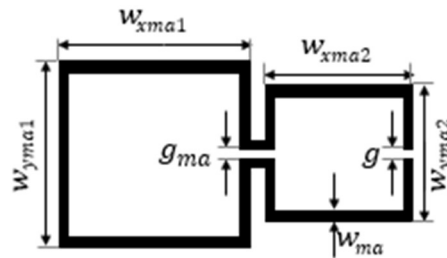
Figura 23 - Geometria matryoska com três anéis concêntricos [5].

Destaque-se que o comprimento efetivo corresponde ao valor aproximado do perímetro do anel matryoska, e que a ressonância ocorre quando esse valor é aproximadamente igual ao comprimento de onda ($L_{eff} \approx \lambda_{eff}$). De maneira geral, a quantidade de anéis, bem como suas características de fabricação, como a largura das fitas (w_{ma}), ou *gap* do anel concêntrico (g_{ma}), podem ser ajustados de acordo com a resposta em frequência desejada.

A geometria matrioska com anel aberto é obtida através da inserção de uma fenda no anel matrioska, Figura 24. Neste caso, semelhante a uma espira aberta, a frequência de ressonância cai para aproximadamente a metade do valor do anel matrioska [9].



a) Geometria matrioska com anel aberto



b) Geometria matrioska com anel aberto expandida

Figura 24 - Geometria matrioska com anel aberto.

Fonte: Autor.

2.5. Ressonador Dielétrico

Com desenvolvimento das telecomunicações, é crescente a busca por materiais de baixo custo que permitam a redução das dimensões dos equipamentos móveis, mantendo a qualidade, ou até mesmo melhor, a eficiência na recepção de sinal. Dessa maneira materiais com características dielétricas específicas (baixas tangentes de perdas, elevadas constante dielétrica etc.) vêm atraindo a atenção de pesquisadores, na investigação de possíveis aplicações em dispositivos móveis [12], [13].

Nesse contexto, os ressonadores dielétricos são materiais que se formam sob uma alta pressão e calor devido a sua estrutura cristalina, e podem ser classificados como componentes sólidos inorgânicos. Em sua estrutura cristalina possuem íons eletricamente carregados (cátions/ânions), os quais são contrabalanceados de forma a garantir eletroneutralidade do material cerâmico [33], [34].

Em outras palavras, pode-se dizer que ressonadores dielétricos são materiais que apresentam características de isolante térmicos e elétricos, além disso, alta dureza e altos pontos de fusão e ebulição [33], [34]. Outra característica importante, são as interfaces entre os grãos, as quais, permitem possíveis mudanças estruturais, e em consequência disto, podem apresentar diferentes composições e diferentes propriedades dielétricas.

Ressonadores são projetados para substituir cavidades ressonantes em aplicações de micro-ondas, como por exemplo: filtros e osciladores. Para que seja viável a aplicação de um dielétrico cerâmico na miniaturização de dispositivos nos sistemas de

telecomunicações, algumas características devem ser observadas, tais como: um alto fator de qualidade (Q), que está associada a capacidade que o material tem de armazenar energia com o mínimo de perdas possível, e um coeficiente de temperatura na frequência de ressonância (τ_f) estável [33], [34]. A seguir são comentados, de forma geral, esses parâmetros.

2.5.1. Frequência de Ressonância (f_r)

É a frequência para qual o ressonador ressoa com a menor perda possível, sendo esse parâmetro normalmente definido pela constante dielétrica do material (ϵ_r) e pelo volume do ressonador.

2.5.2. Constante Dielétrica (ϵ_r)

Esse parâmetro é responsável por dimensionar o tamanho do ressonador, visto que, quanto maior for a constante dielétrica do material, maior será a concentração dos campos.

2.5.3. Fator de Qualidade (Q)

O fator de qualidade do ressonador é dado pela tangente de perdas do material, e pode ser definido como a capacidade que o ressonador tem de armazenar energia. Ele pode ser definido numericamente pelas seguintes fórmulas:

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

Onde o ϵ' e ϵ'' são, respectivamente, as partes real e imaginária da constante dielétrica, e $tg(\delta)$ é a tangente de perdas do material.

O fator Q pode ser definido pela seguinte fórmula:

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

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

Não menos importante é o coeficiente de temperatura, pois para manter o sistema estável com a temperatura, se faz necessário utilizar um ressonador dielétrico com coeficiente de temperatura estável e positivo, dessa maneira assegurando um bom funcionamento do sistema.

Nesta proposta de dissertação é utilizado um material cerâmico à base de titanato de magnésio e cálcio, MCT. Esse material apresenta constantes dielétricas que variam de 18 a 140, mas no presente trabalho será utilizado o MCT-115, o qual possui $\epsilon_r = 115$ [33].

2.6. Parâmetros de Análise dos Filtros

Um ponto importante é de como os filtros são analisados. Nesta dissertação são utilizados parte dos parâmetros descritos a seguir, tomando como base a Figura 25.

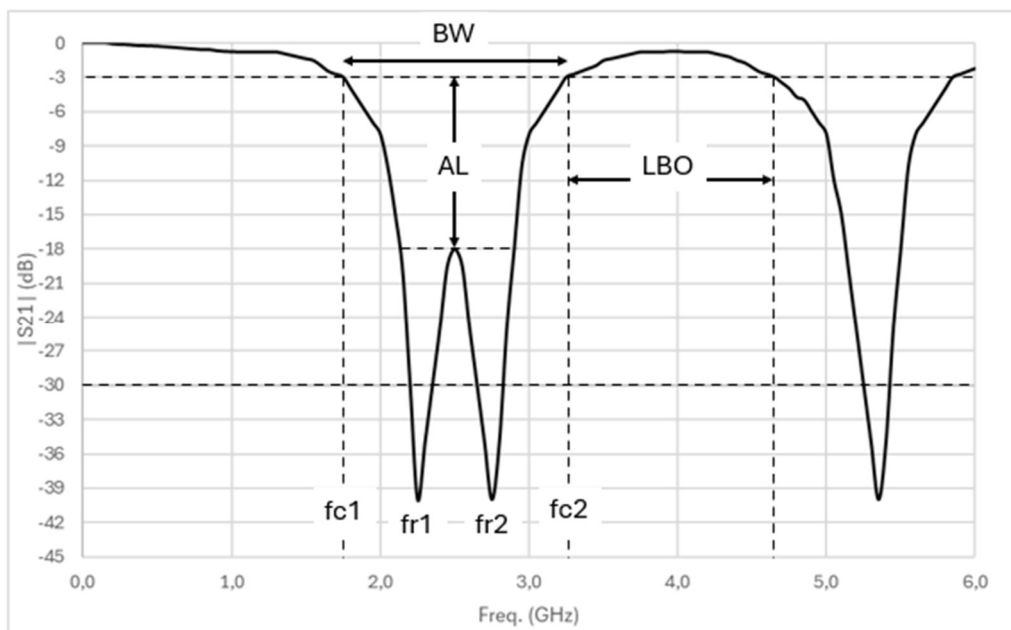


Figura 25 – Resposta em frequência típica de um ressonador com dois ou mais anéis matrioska.

Fonte: Autor.

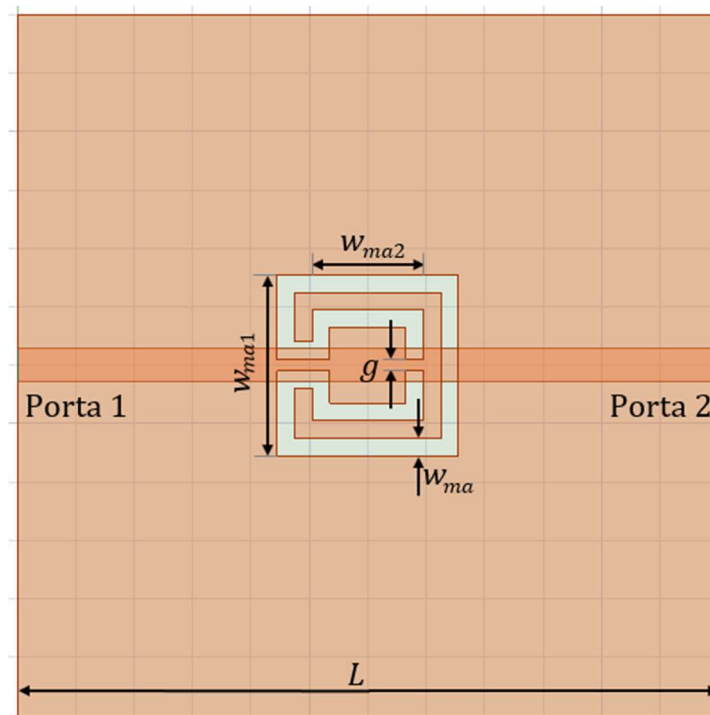
- Frequência de corte em -3 dB , f_{c1} e f_{c2} ;
- Frequência de ressonância, f_{r1} e f_{r2} ;
- Largura de banda de rejeição definida em -3 dB , BW . Obs.: Para este trabalho será adotado largura de banda de rejeição em -10 dB .
- Atenuação Livre, AL ;

- Região de transição de -3 dB a -30 dB . Obs.: além do -30 dB , poderá ser adotado outro valor de atenuação para a região de transição;
- Largura de banda de operação, LBO , corresponde a faixa de frequência após a largura de banda de rejeição, para a qual não surge uma nova ressonância.

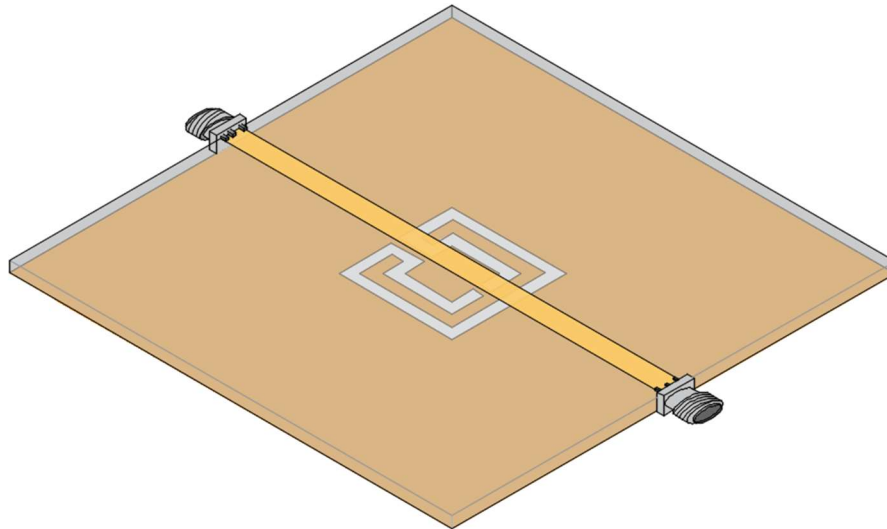
3. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados numéricos e experimentais objetivaram avaliar as características de miniaturização, seletividade e a possibilidade de ajuste da frequência de ressonância, onde a partir da geometria inicial de uma DGS-matrioska de anel aberto, foram realizadas simulações numéricas utilizando o software ANSYS HFSS [34], as quais possibilitaram avaliar o comportamento dos parâmetros (frequência de ressonância e a largura de banda) dos filtros propostos associados a um ressonador dielétrico.

Diante disto, neste trabalho foram utilizadas estruturas com dimensões diferentes, objetivando analisar o comportamento das frequências de ressonância e da largura de banda. Os quatro filtros foram projetados considerando um substrato dielétrico de baixo custo, o FR4, com $\epsilon_r = 4,4$, e tangente de perdas $tg(\delta) = 0,02$, com dimensões de 60 mm x 60 mm x 1,6 mm. A largura da microfita é $w = 2,8$ mm. As dimensões da DGS-matrioska são apresentadas na Tabela I, Figura 26.



a) Vista superior



b) Vista isométrica

Figura 26 – Dimensões do filtro DGS matrioska de anel aberto.

Fonte: Autor.

Tabela 1 – Dimensionamento das DGSs (em mm)

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

O ressonador dielétrico, DR (do inglês *dielectric resonator*) tem dimensões de $8\text{ mm} \times 9\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, o qual se trata de um material cerâmico do tipo MCT-115. Para mover o dielétrico em determinada posição do substrato, foi considerado um plano xy , dessa maneira sua posição foi determinada pelas coordenadas (dpx , dpy), conforme ilustrado pela Figura 27.

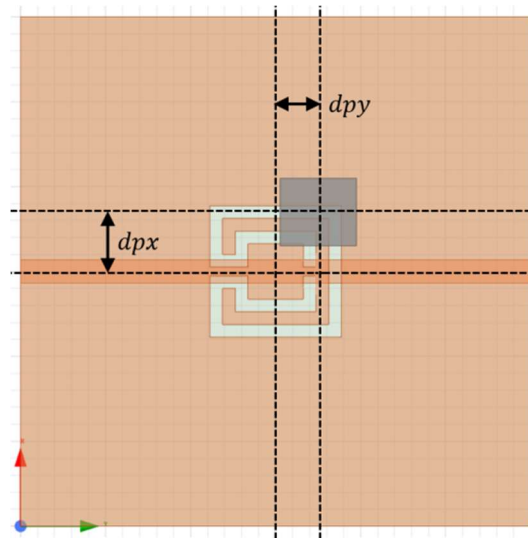


Figura 27 – Posição do dielétrico no plano xy [36].

3.1. Filtro DGS-Matrioska de anel aberto com DR em diferentes posições (dpx , dpy): resultados numéricos e experimentais

Inicialmente, as quatro DGSs foram caracterizadas numericamente em quatro situações:

- DGS sem o DR.
- DR colocado no centro da DGS ($dpx = dpy = 0,0 \text{ mm}$).
- DR na quina da DGS ($dpx = dpy = w_{ma1}/2$), e por fim,
- DR foi colocado diretamente sobre a fenda ($dpx = 0,0 \text{ mm}$, $dpy = w_{ma1}/2$).

Em seguida, 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 [37], Figura 28, foi possível a obtenção do parâmetro S_{21} , de 0,01 GHz a 5 GHz.

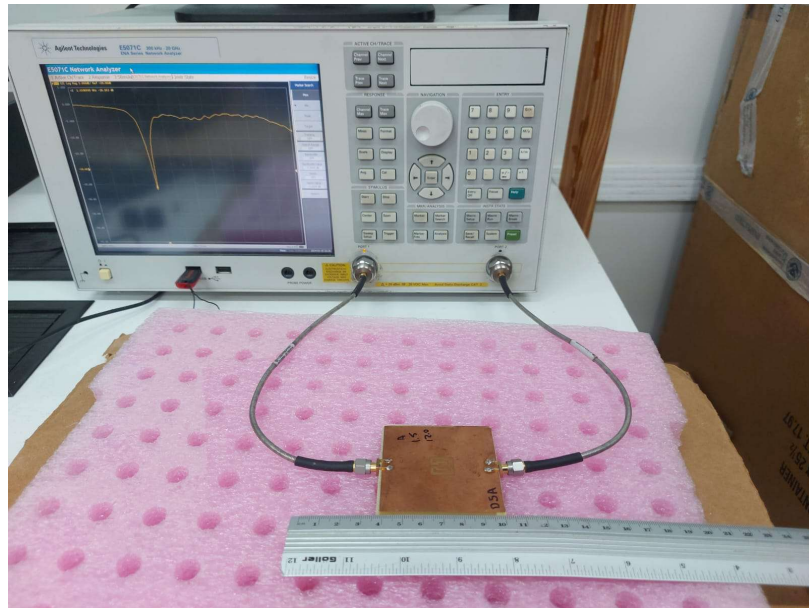


Figura 28 – Configuração da caracterização experimental.

Fonte: Autor.

Os resultados numéricos e experimentais das DGS1, DGS2, DGS3 e DGS4, serão apresentados nas Figuras 29-40.

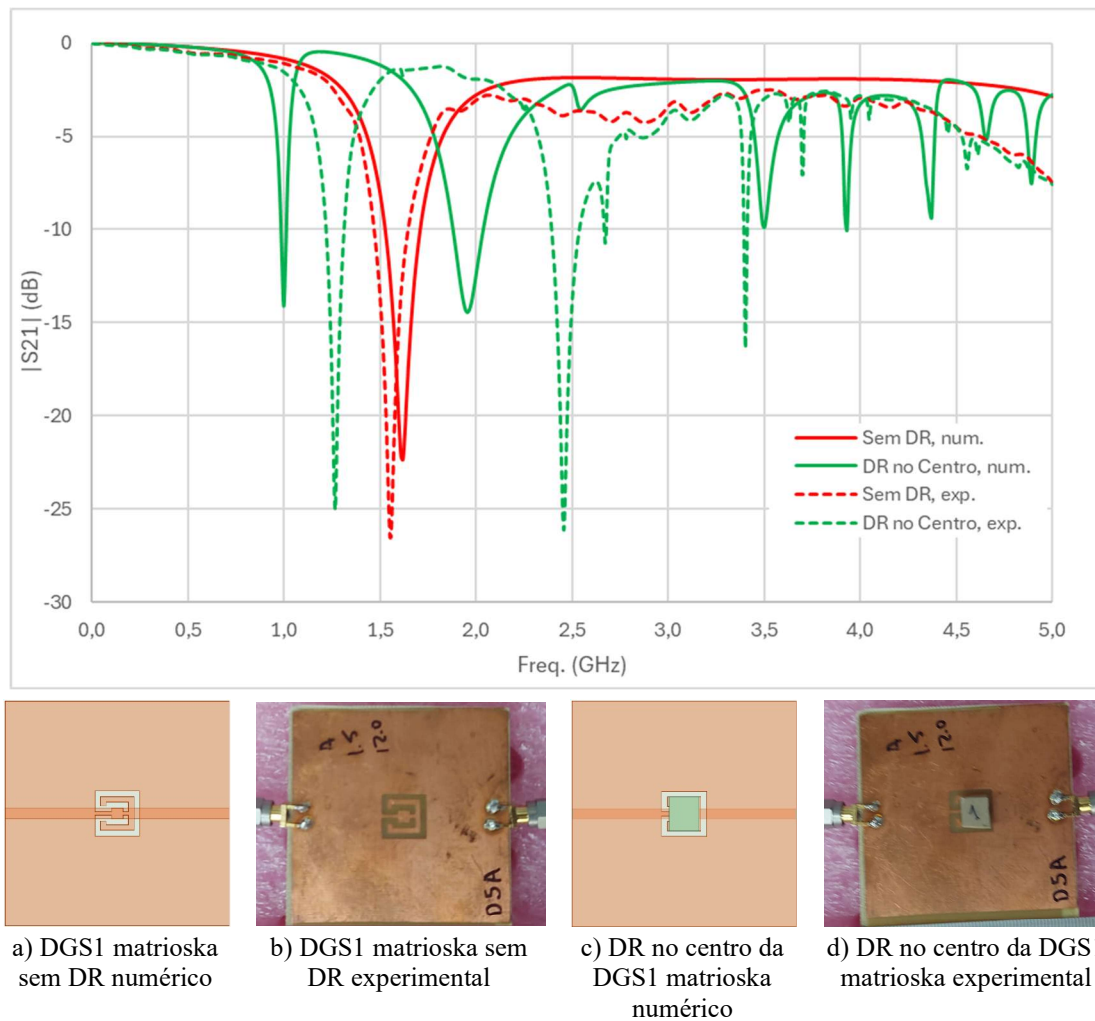


Figura 29 – Resposta em frequência da DGS1 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR no centro da DGS (vista inferior).

Fonte: Autor.

Inicialmente a DGS1 foi caracterizada sem a presença do DR, Figura 29. Dessa maneira, a frequência de ressonância apresentada na forma experimental foi de $1,55 \text{ GHz}$, e de $1,62 \text{ GHz}$ para forma numérica, observando-se uma diferença de 4,52%, apresentando uma boa concordância entre os resultados experimental e numérico. Além disso, considerando os resultados obtidos a partir das Equações de (1)-(3), onde a frequência de ressonância calculada foi de $1,83 \text{ GHz}$, observa-se uma diferença de 18,03%, quando comparado ao resultado experimental, e de 12,93% quando comparado ao resultado numérico. Essa diferença entre o valor calculado e os valores experimentais e numéricos se justificam, pois com as menores dimensões, as Equações (1)-(3) têm uma menor precisão.

Para DGS1 com DR no centro, resultados experimentais, foi observada uma redução de 18,06%, quando comparado à DGS sem o DR. Na forma numérica, verificou-se uma redução de 38,27%.

Comparando as larguras de banda, calculadas em -10 dB , a DGS1 na forma experimental apresentou uma redução de 50,00%, enquanto na forma numérica apresentou uma redução de 83,33%. Esses valores são resumidos na Tabela 2.

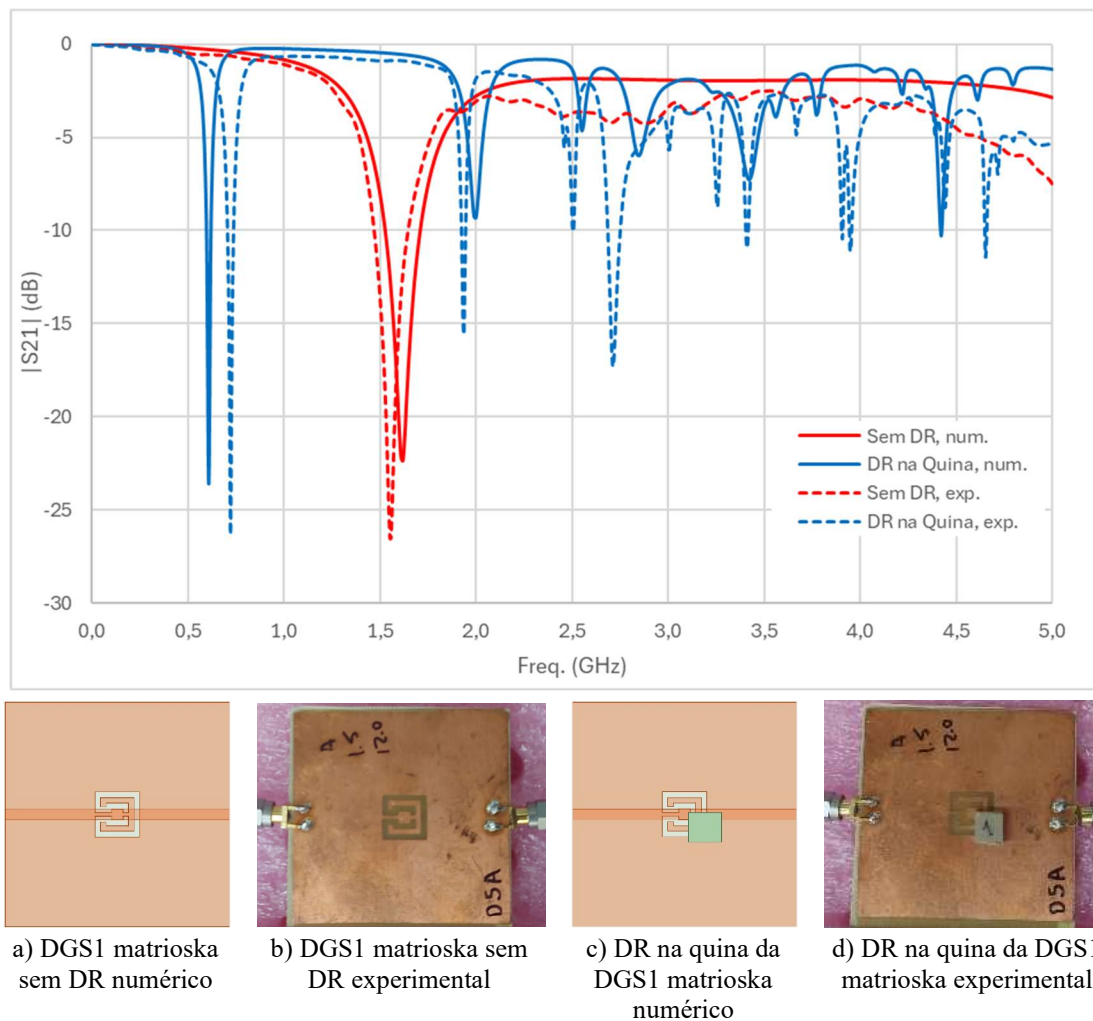


Figura 30 – Resposta em frequência da DGS1 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na quina da DGS (vista inferior).

Fonte: Autor.

Para DGS1 com DR na quina, quando comparada a DGS sem o DR, observou-se que a frequência de ressonância para forma experimental apresentou uma redução de 53,55%, e na forma numérica verificou-se uma redução de 62,35%. Além disso, ao

comparar os resultados numéricos e experimentais, a frequência de ressonância da DGS1 com o DR na quina apresentou uma diferença de aproximadamente 15,28%.

Comparando a DGS1 com o DR na quina com a DGS1 sem DR, as larguras de banda, determinadas em -10 dB , experimentalmente verifica-se uma redução de 83,33%. Numericamente, observa-se uma redução 88,89%. Esses valores são resumidos na Tabela 2.

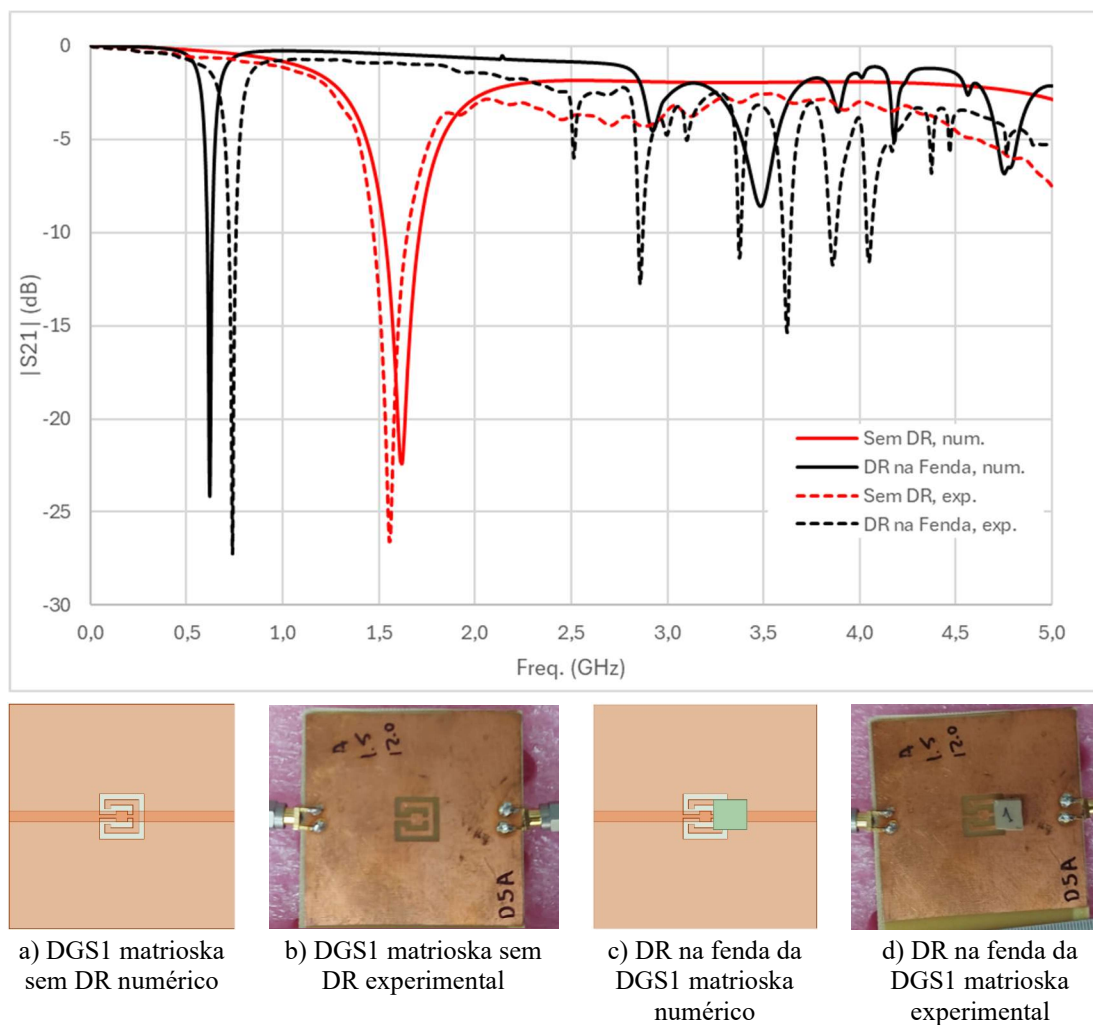


Figura 31 – Resposta em frequência da DGS1 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na fenda da DGS (vista inferior).

Fonte: Autor.

Comparando a DGS1 com DR na fenda com a DGS1 sem DR, experimentalmente, verificou-se que a frequência de ressonância apresentou uma redução de 52,26%. Numericamente, essa redução foi de 61,73%. Para a DGS1 com DR na fenda, para a

frequência de ressonância, a diferença entre os resultados numéricos e experimentais foi de 16,22%.

Comparando a DGS1 com DR na fenda com a DGS1 sem DR, comparando as larguras de banda, calculadas em -10 dB , a DGS1 com DR apresentou numericamente uma redução de 83,33%, e, experimentalmente, uma redução de 88,89%. Esses valores são resumidos na Tabela 2. Concluindo, para a DGS1, observa-se que as características verificadas na fenda e na quina são aproximadamente as mesmas.

Tabela 2 – Resumo dos resultados obtidos para DGS1

	DGS1	DGS1_{DR Centro}	DGS1_{DR Quina}	DGS1_{DR Fenda}
$(d_{px} \times d_{py})(\text{mm} \times \text{mm})$	–	$0,0 \times 0,0$	$-3,5 \times 5,5$	$0,5 \times 6,5$
$f_{res.calc.}(\text{GHz})$	1,83	–	–	–
$f_{res.num.}(\text{GHz})$	1,62	1,00	0,61	0,62
$f_{res.exp.}(\text{GHz})$	1,55	1,27	0,72	0,74
$\frac{((f_{res.calc.} - f_{res.num.}) \times 100\%)}{f_{res.num.}}$	12,93%	–	–	–
$\frac{((f_{res.calc.} - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	18,03%	–	–	–
$\frac{((f_{res.num.} - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	4,52%	–	–	–
$\frac{((f_{res.num.DR} - f_{res.num.}) \times 100\%)}{f_{res.num.}}$	–	–38,27%	–62,35%	–61,73%
$\frac{((f_{res.exp.DR} - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	–	–18,06%	–53,55%	–52,26%
$BW_{num.}(-10\text{dB})(\text{GHz})$	0,18	0,03	0,02	0,03
$BW_{exp.}(-10\text{dB})(\text{GHz})$	0,18	0,09	0,03	0,03
$\frac{((BW_{num.DR} - BW_{num.}) \times 100\%)}{BW_{num.}}$	–	–83,33%	–88,89%	–83,33%
$\frac{((BW_{exp.DR} - BW_{exp.}) \times 100\%)}{BW_{exp.}}$	–	–50,00%	–83,33%	–83,33%
NCS	$0,062\lambda_0$ $\times 0,062\lambda_0$ $\times 0,008\lambda_0$	$0,050\lambda_0$ $\times 0,050\lambda_0$ $\times 0,027\lambda_0$	$0,033\lambda_0$ $\times 0,038\lambda_0$ $\times 0,015\lambda_0$	$0,032\lambda_0$ $\times 0,030\lambda_0$ $\times 0,016\lambda_0$

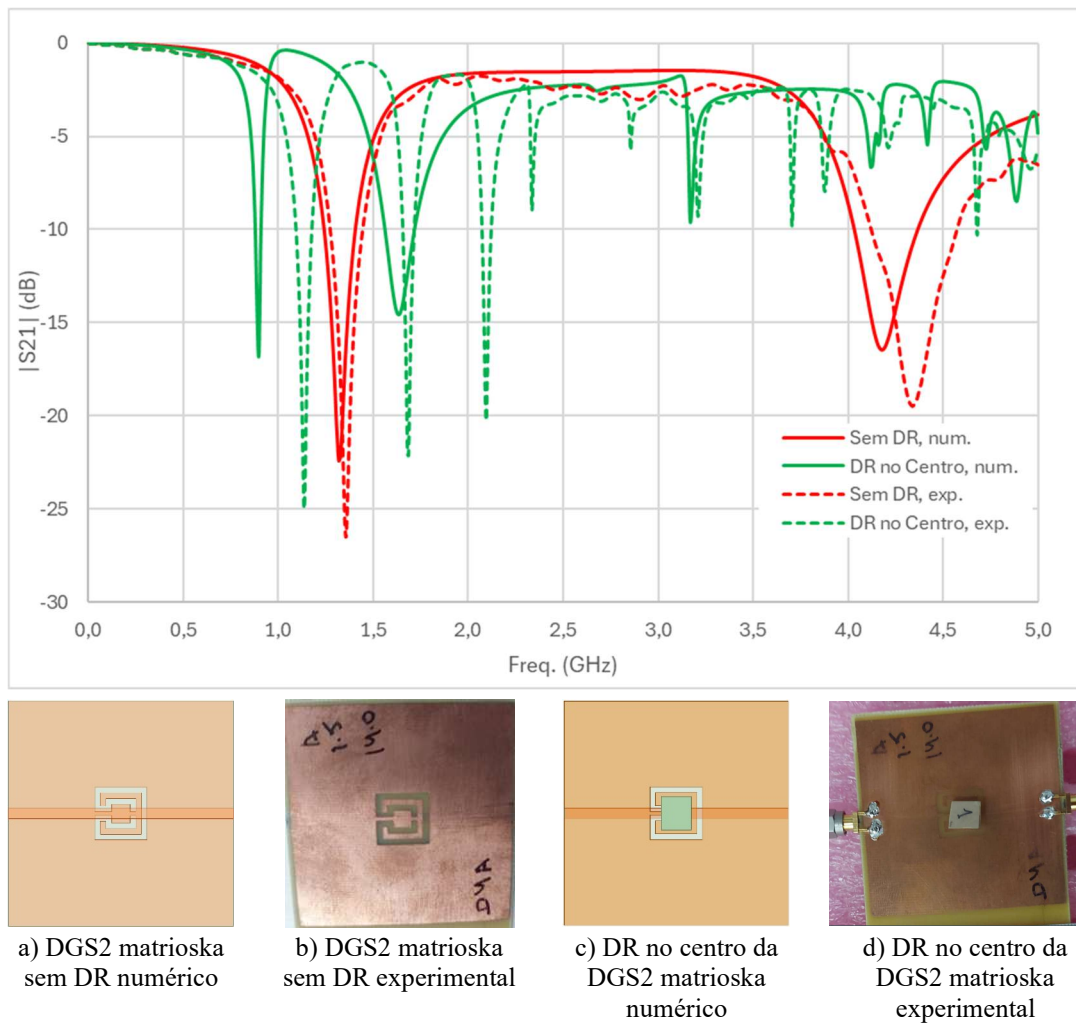


Figura 32 – Resposta em frequência da DGS2 matriska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR no centro da DGS (vista inferior).

Fonte: Autor.

Para a DGS2 simulada e caracterizada experimentalmente sem a presença do DR, Figura 32, a frequência de ressonância apresentada na forma experimental foi de $1,36\text{ GHz}$, e de $1,32\text{ GHz}$ para forma numérica, observando-se por sua vez uma boa concordância entre os resultados experimental e numérico. Além disso a frequência de ressonância calculada foi de $1,44\text{ GHz}$, a forma experimental apresentou uma diferença de $5,83\%$ na sua frequência de ressonância o que demonstrou uma boa proximidade entre a DGS experimental e a calculada, no entanto forma numérica uma diferença de $8,60\%$ na sua frequência de ressonância o que caracteriza uma proximidade com a frequência calculada.

Observando os resultados apresentados para a DGS2 com DR no centro, a frequência de ressonância para forma experimental apresentou uma redução de $16,18\%$,

no entanto a forma numérica apresentou uma redução de 31,82%, dessa maneira ao comparar a DGS2 na forma numérica com a experimental, foi possível observar uma diferença de 21,05% na frequência de ressonância para configuração com DR no centro da DGS. Comparando as larguras de banda, calculadas em -10 dB , a DGS na forma experimental apresentou uma redução de 50%, enquanto na forma numérica apresentou uma redução de 76,47%. Esses valores são resumidos na Tabela 3.

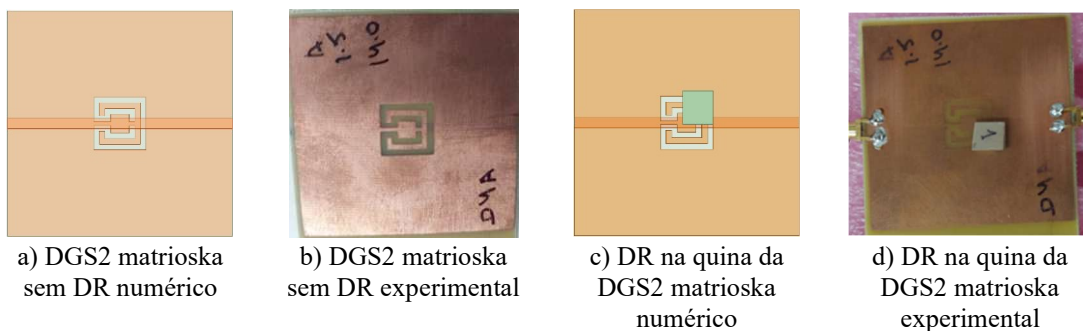
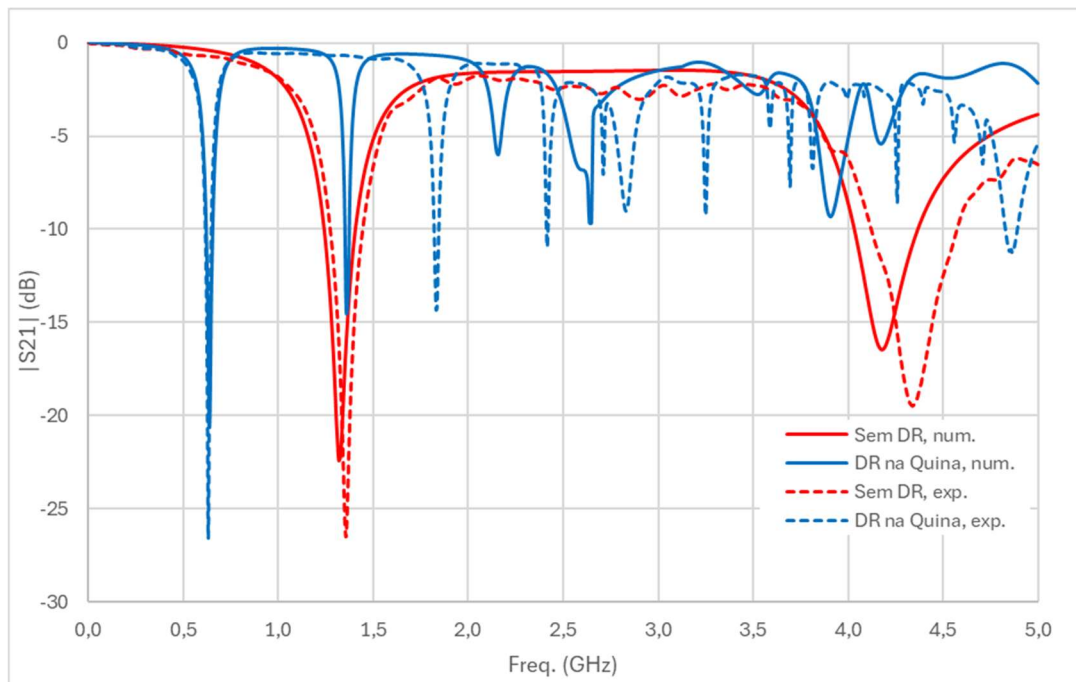


Figura 33 – Resposta em frequência da DGS2 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na quina da DGS (vista inferior).

Fonte: Autor.

Observando a DGS2 com DR na quina, Figura 33, constatou-se que a frequência de ressonância para forma experimental apresentou uma redução de 53,68% e, na forma numérica apresentou uma redução de 51,52%, além disso ao comparar a DGS na forma numérica com a experimental, foi possível observar uma proximidade 1,59% na

frequência de ressonância, o que demonstra uma boa concordância das DGS numérica e experimental com o DR na quina. Comparando as larguras de banda, calculadas em -10 dB , a forma experimental apresentou uma redução de 81,25%, enquanto na forma numérica apresentou uma redução de 82,35% dessa forma observando-se também uma boa concordância em suas larguras de banda. Esses valores são resumidos na Tabela 3.

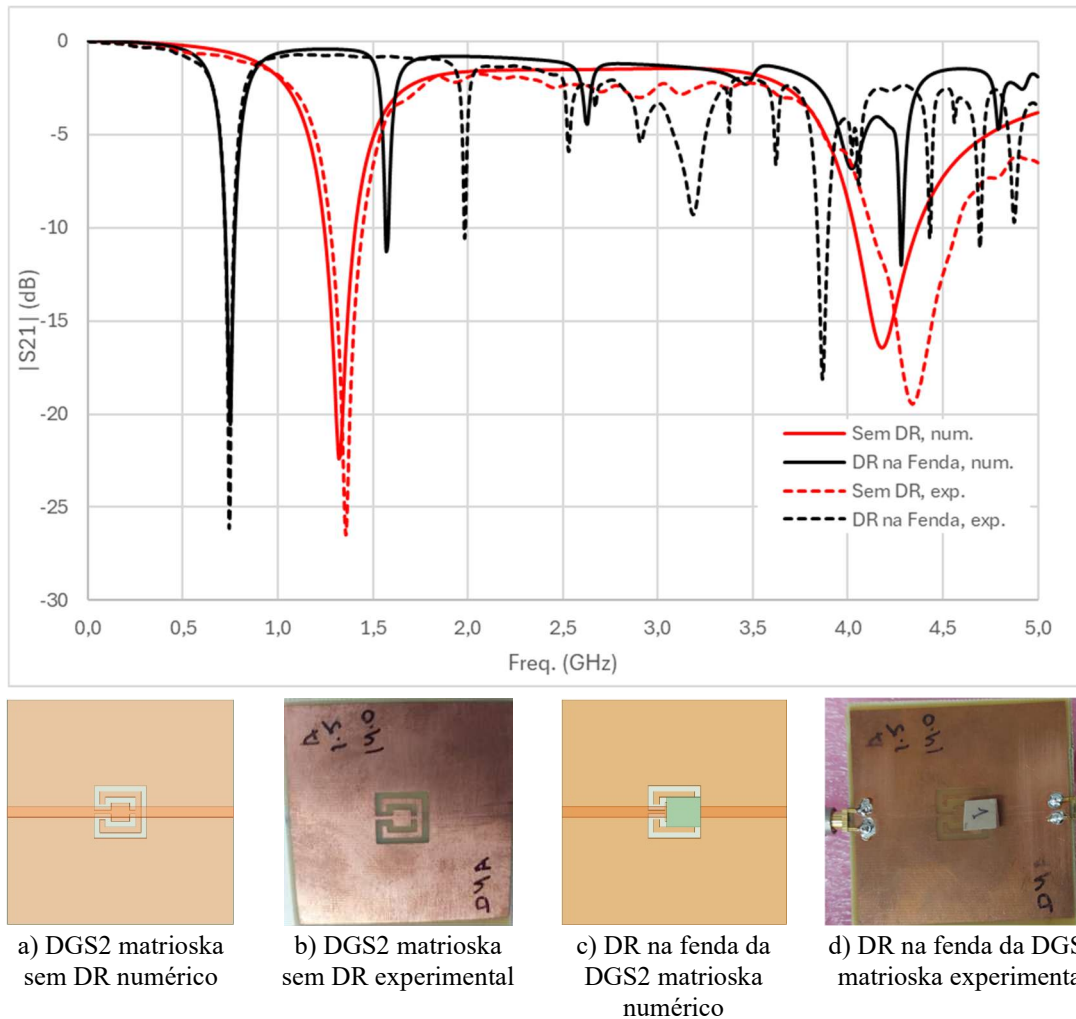


Figura 34 – Resposta em frequência da DGS2 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na fenda da DGS (vista inferior).

Fonte: Autor.

Para a DGS2 com DR na fenda, Figura 34, observou-se que a frequência de ressonância para forma experimental apresentou uma redução de 45,59% e, na forma numérica apresentou uma redução de 43,18%, comparando a DGS na forma numérica com a experimental, foi observado uma proximidade de 1,35% na frequência de ressonância, dessa forma apresentando uma boa concordância entre suas frequências de ressonância para situação com DR na fenda da DGS. Comparando as larguras de banda, calculadas em -10 dB , na forma experimental apresentou uma redução de 68,75%,

enquanto na forma numérica apresentou uma redução de 70,59% onde foi possível observar uma boa concordância em seus percentuais de seletividade de sinal. Esses valores são resumidos na Tabela 3. Para a DGS2, verifica-se um efeito maior do DR quando aplicado na quina, ainda que uma boa redução da frequência de ressonância seja também observada quando o DR é colocado na fenda.

Tabela 3 – Resumo dos resultados obtidos para DGS2

	DGS2	DGS2_{DR Centro}	DGS2_{DR Quina}	DGS2_{DR Fenda}
$(dpx \times dpy)(mm \times mm)$	–	0,0 × 0,0	4,0 × 3,0	0,0 × 2,5
$f_{res.calc.}(GHz)$	1,44	–	–	–
$f_{res.num.}(GHz)$	1,32	0,90	0,64	0,75
$f_{res.exp.}(GHz)$	1,36	1,14	0,63	0,74
$\frac{((f_{res.calc.} - f_{res.num.}) \times 100\%)}{f_{res.num.}}$	9,41%	–	–	–
$\frac{((f_{res.calc.} - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	6,20%	–	–	–
$\frac{((f_{res.num.} - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	–2,94%	–	–	–
$\frac{((f_{res.num.}DR - f_{res.num.}) \times 100\%)}{f_{res.num.}}$	–	–31,82%	–51,52%	–43,18%
$\frac{((f_{res.exp.}DR - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	–	–16,18%	–53,68%	–45,59%
$BW_{num.}(-10dB)(GHz)$	0,17	0,04	0,03	0,05
$BW_{exp.}(-10dB)(GHz)$	0,16	0,08	0,03	0,05
$\frac{((BW_{num.}DR - BW_{num.}) \times 100\%)}{BW_{num.}}$	–	–76,47%	–82,35%	–70,59%
$\frac{((BW_{exp.}DR - BW_{exp.}) \times 100\%)}{BW_{exp.}}$	–	–50%	–81,25%	–68,75%
NCS	0,063 λ_0 × 0,063 λ_0 × 0,007 λ_0	0,053 λ_0 × 0,053 λ_0 × 0,025 λ_0	0,032 λ_0 × 0,030 λ_0 × 0,013 λ_0	0,034 λ_0 × 0,034 λ_0 × 0,016 λ_0

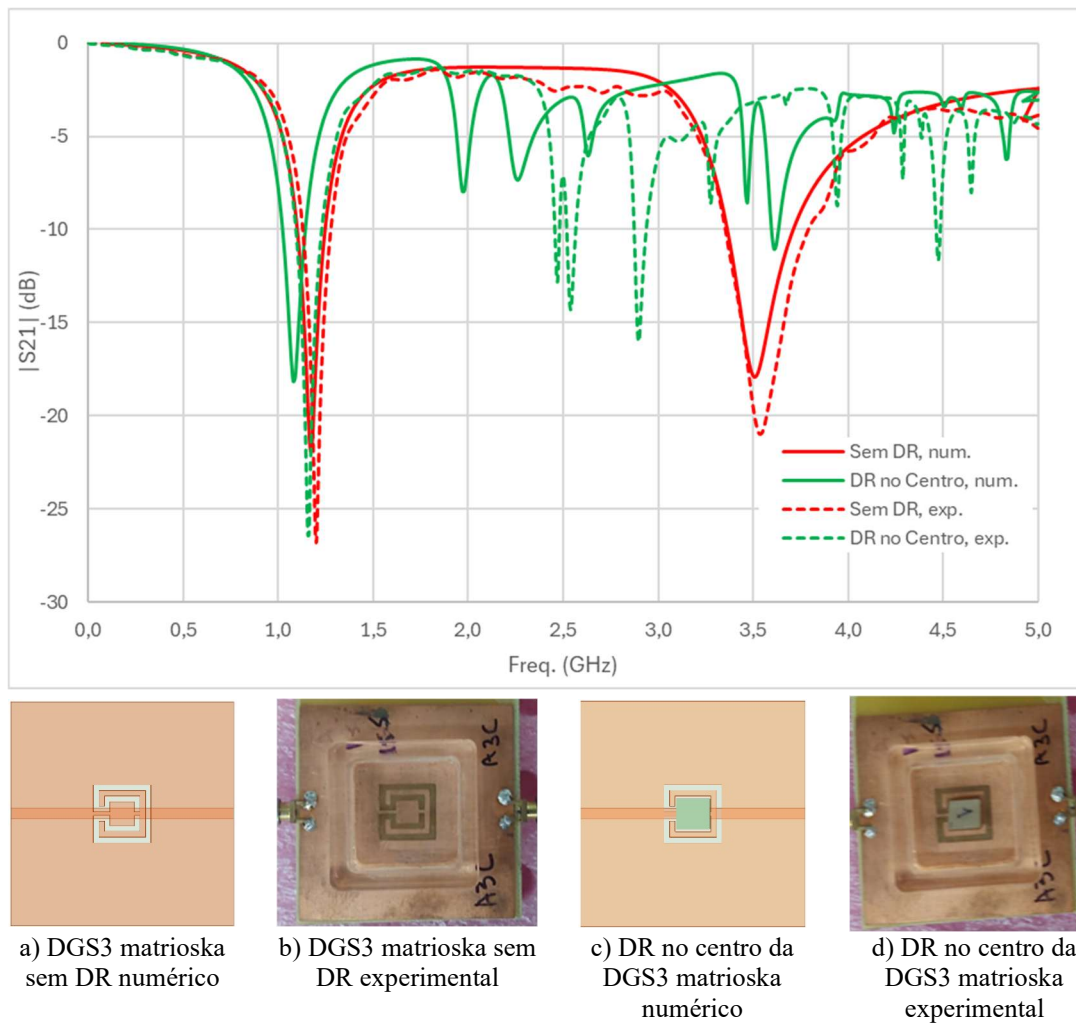


Figura 35 – Resposta em frequência da DGS3 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR no centro da DGS (vista inferior).

Fonte: Autor.

Para a DGS3 simulada e caracterizada experimentalmente sem a presença do DR, Figura 35, foi observado que a frequência de ressonância apresentada na forma experimental foi de 1,20 GHz, 1,17 GHz para forma numérica, e de 1,25 GHz para a calculada, dessa maneira observou-se que a forma experimental apresentou uma diferença de 3,79% na sua frequência de ressonância, e a forma numérica uma diferença de 6,20%, quando comparadas a frequência de ressonância calculada, o que demonstrou uma boa concordância da frequência de ressonância de ambas as DGS, com a frequência de ressonância calculada, no entanto o resultado experimental apresentado pela DGS apresentou uma proximidade maior.

Para a DGS3 com DR no centro, a frequência de ressonância para forma experimental apresentou uma redução de 3,33%, no entanto a forma numérica apresentou

uma redução de 7,69%, comparando os resultados apresentados da DGS3 na forma numérica com a experimental, foi possível observar uma diferença de 6,90% na frequência de ressonância para configuração com DR no centro da DGS. Comparando as larguras de banda, calculadas em -10 dB , a DGS na forma experimental apresentou uma redução de 6,67%, enquanto na forma numérica apresentou uma redução de 20%. Esses valores são resumidos na Tabela 4.

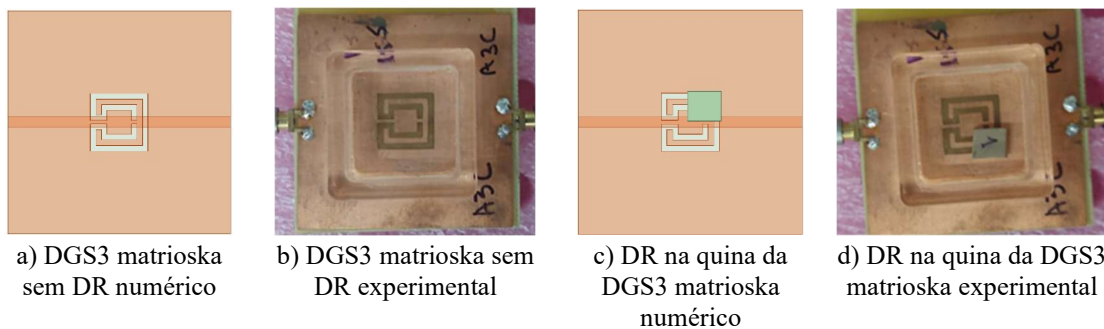
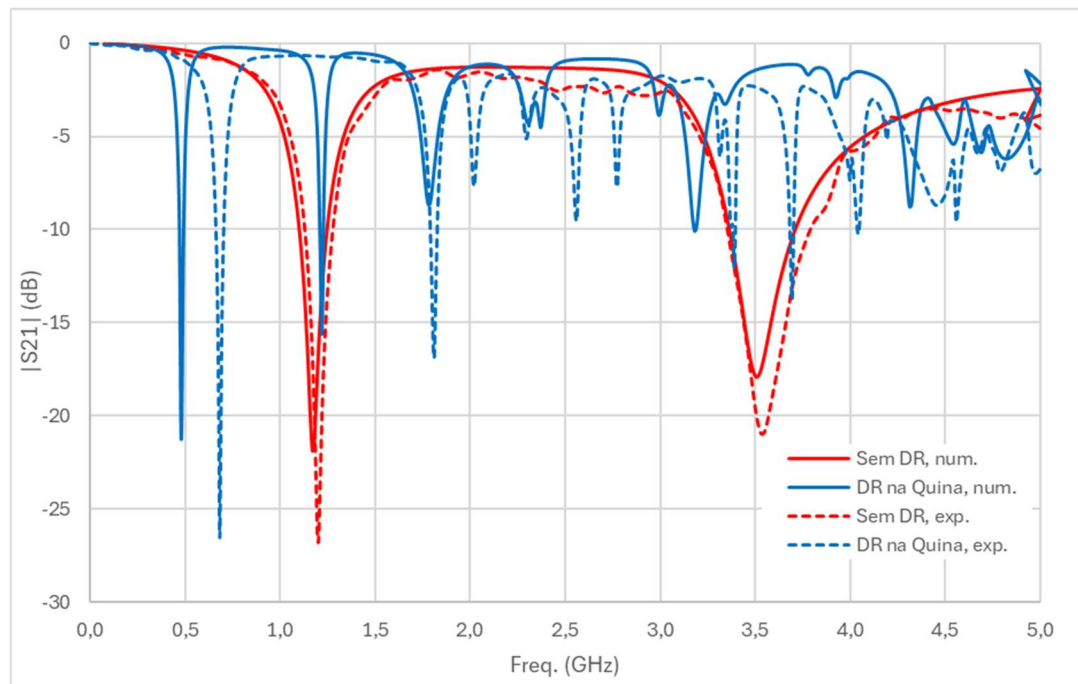
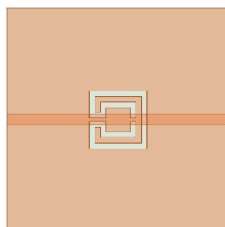
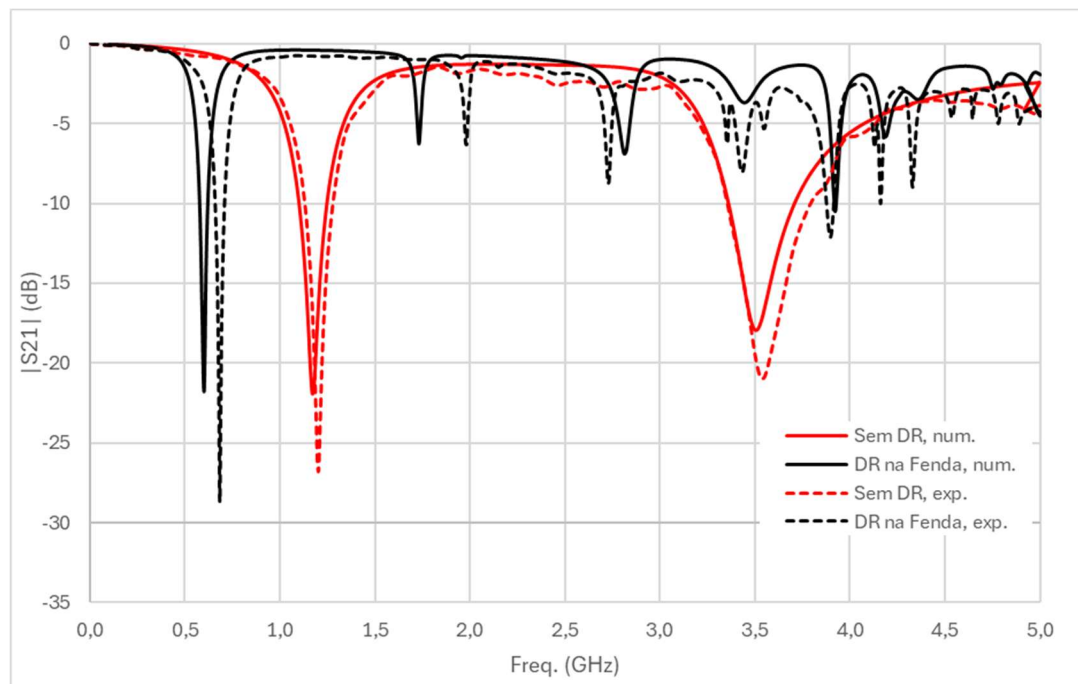


Figura 36 – Resposta em frequência da DGS3 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na quina da DGS (vista inferior).

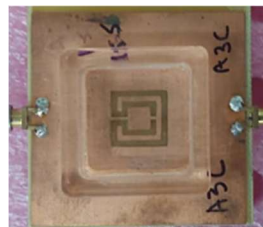
Fonte: Autor.

Observando a DGS3 com DR na quina, constatou-se que a frequência de ressonância para forma experimental apresentou uma redução de 43,33% e, na forma numérica apresentou uma redução de 58,97%, além disso ao comparar a DGS na forma numérica com a experimental, foi possível observar uma diferença 29,41% na frequência

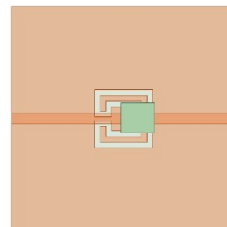
de ressonância. Comparando as larguras de banda, calculadas em -10 dB , a forma experimental apresentou uma redução de 73,33%, enquanto na forma numérica apresentou uma redução de 86,67% dessa forma observando-se uma maior seletividade do sinal quando comparada a forma experimental. Esses valores são resumidos na Tabela 4.



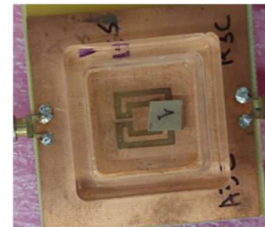
a) DGS3 matrioska sem DR numérico



b) DGS3 matrioska sem DR experimental



c) DR na fenda da DGS3 matrioska numérico



d) DR na fenda da DGS3 matrioska experimental

Figura 37 – Resposta em frequência da DGS3 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na fenda da DGS (vista inferior).

Fonte: Autor.

Observando os resultados apresentados para a DGS3 com DR na fenda, a frequência de ressonância para forma experimental apresentou uma redução de 43,33% e, na forma numérica apresentou uma redução de 48,72%, comparando a DGS na forma numérica com a experimental, foi observado uma diferença de 11,76% na frequência de ressonância. Comparando as larguras de banda, calculadas em -10 dB , na forma

experimental apresentou uma redução de 66,67%, enquanto na forma numérica apresentou uma redução de 66,67% onde foi possível observar uma boa concordância em seus percentuais de seletividade de sinal. Esses valores são resumidos na Tabela 4. Embora numericamente seja esperada uma maior redução da frequência de ressonância quando o DR é colocado na quina, isso não foi verificado experimentalmente. Provavelmente, essa diferença decorre do posicionamento e da fixação do DR.

Tabela 4 – Resumo dos resultados obtidos para DGS3

	DGS3	DGS3_{DR Centro}	DGS3_{DR Quina}	DGS3_{DR Fenda}
$(dpx \times dpy)(mm \times mm)$	–	0,0 × 0,0	4,25 × 3,75	0,0 × 4,0
$f_{res.calc.}(GHz)$	1,25	–	–	–
$f_{res.num.}(GHz)$	1,17	1,08	0,48	0,60
$f_{res.exp.}(GHz)$	1,20	1,16	0,68	0,68
$\frac{((f_{res.calc.} - f_{res.num.}) \times 100\%)}{f_{res.num.}}$	6,61%	–	–	–
$\frac{((f_{res.calc.} - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	3,94%	–	–	–
$\frac{((f_{res.num.} - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	–2,50%	–	–	–
$\frac{((f_{res.num.DR} - f_{res.num.}) \times 100\%)}{f_{res.num.}}$	–	–7,69%	–58,97%	–48,72%
$\frac{((f_{res.exp.DR} - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	–	–3,33%	–43,33%	–43,33%
$BW_{num.}(-10dB)(GHz)$	0,15	0,12	0,02	0,05
$BW_{exp.}(-10dB)(GHz)$	0,15	0,14	0,04	0,05
$\frac{((BW_{num.DR} - BW_{num.}) \times 100\%)}{BW_{num.}}$	–	–20,00%	–86,67%	–66,67%
$\frac{((BW_{exp.DR} - BW_{exp.}) \times 100\%)}{BW_{exp.}}$	–	–6,67%	–73,33%	–66,67%
NCS	0,062 λ_0 × 0,062 λ_0 × 0,006 λ_0	0,059 λ_0 × 0,059 λ_0 × 0,025 λ_0	0,037 λ_0 × 0,036 λ_0 × 0,014 λ_0	0,035 λ_0 × 0,036 λ_0 × 0,014 λ_0

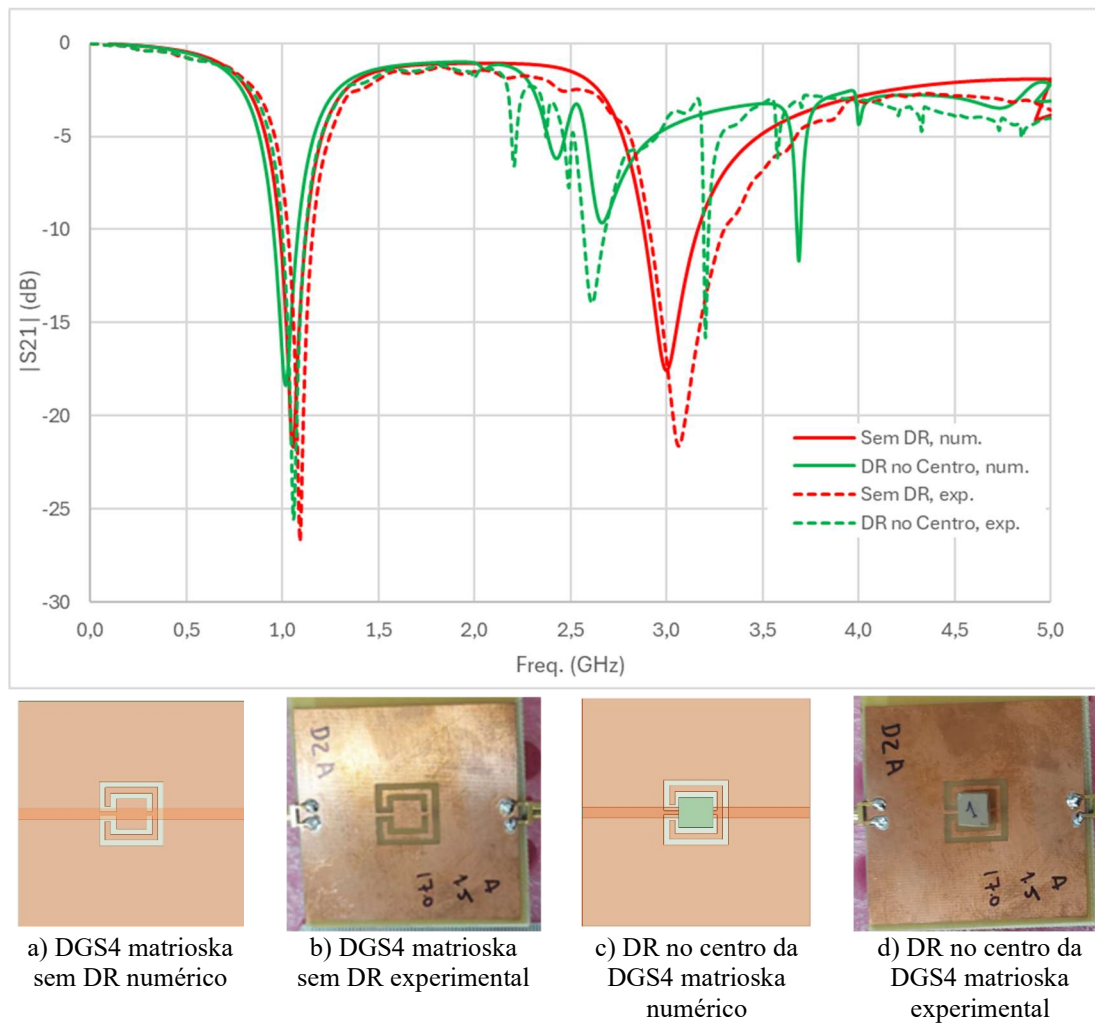


Figura 38 – Resposta em frequência da DGS4 matrisoska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR no centro da DGS (vista inferior).

Fonte: Autor.

Por fim analisando os resultados apresentados para a DGS4 simulada e caracterizada experimentalmente sem a presença do DR, Figura 38, observou-se que a frequência de ressonância apresentada na forma experimental foi de $1,09 \text{ GHz}$, $1,06 \text{ GHz}$ para forma numérica, e de $1,10 \text{ GHz}$ para a calculada, onde a forma experimental apresentou uma diferença de $0,70\%$ na sua frequência de ressonância, e a forma numérica uma diferença de $3,43\%$, quando comparadas a frequência de ressonância calculada, o que demonstrou uma boa concordância da frequência de ressonância de ambas as DGS, com a frequência de ressonância calculada.

Ainda observando a DGS4, agora com DR no centro da DGS a frequência de ressonância para forma experimental apresentou uma redução de $2,75\%$, no entanto a forma numérica apresentou uma redução de $3,77\%$, comparando os resultados

apresentados, foi possível observar uma diferença de 3,77% na frequência de ressonância para configuração com DR no centro numérico. Comparando as larguras de banda, calculadas em -10 dB , a DGS na forma experimental apresentou uma redução de 7,69%, enquanto na forma numérica apresentou uma redução de 0%. Esses valores são resumidos na Tabela 5.

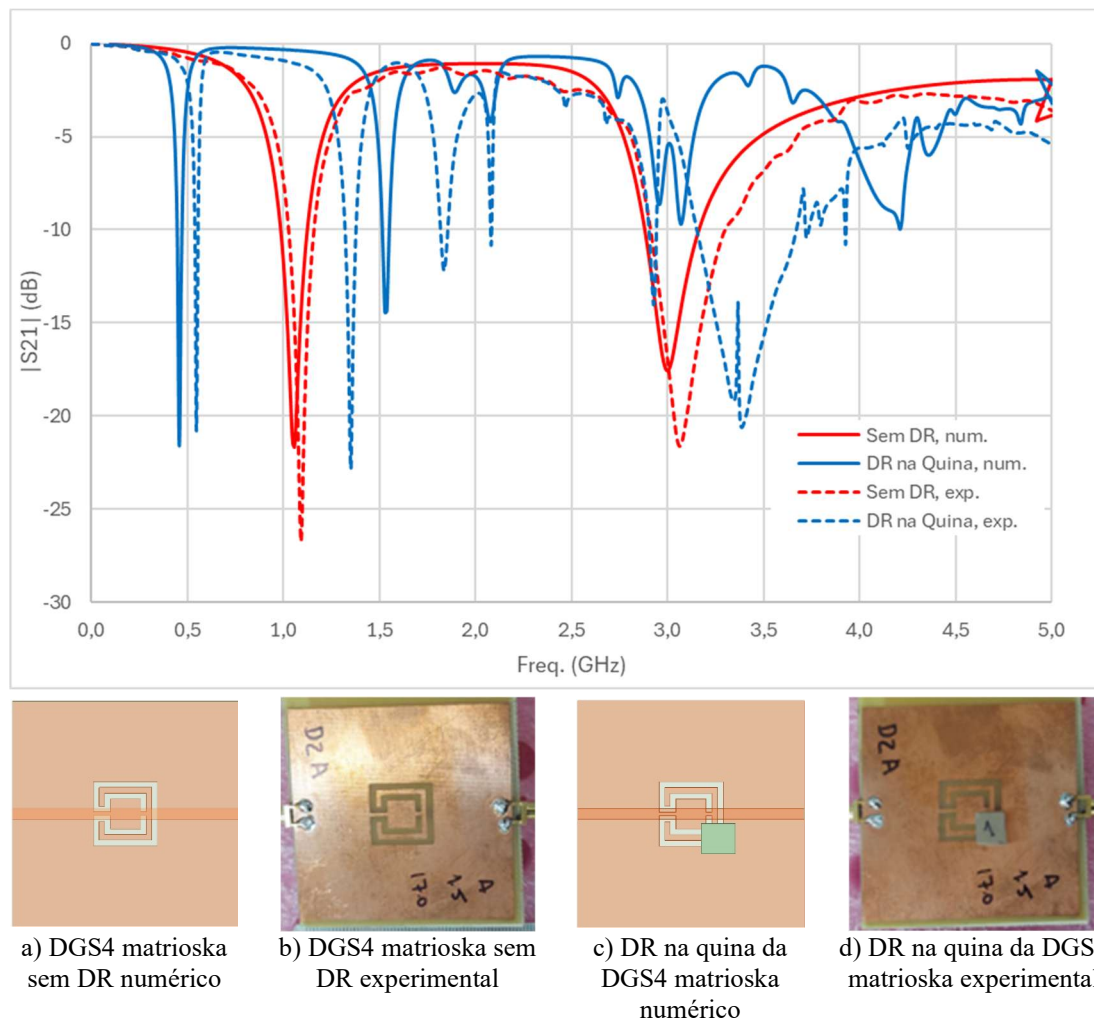


Figura 39 – Resposta em frequência da DGS4 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na quina da DGS (vista inferior).

Fonte: Autor.

Para situação com DR na quina da DGS4, foi observado que a frequência de ressonância para forma experimental apresentou uma redução de 49,54% e, na forma numérica apresentou uma redução de 56,60%, além disso ao comparar a DGS na forma numérica com a experimental, foi possível observar uma diferença 16,36% na frequência de ressonância. Comparando as larguras de banda, calculadas em -10 dB , a forma

experimental apresentou uma redução de 84,62%, enquanto na forma numérica apresentou uma redução de 78,57% dessa forma apresentando uma maior seletividade do sinal quando comparada a forma experimental. Esses valores são resumidos na Tabela 5. De maneira semelhante à DGS3, numericamente é esperada uma maior redução da frequência de ressonância quando o DR é colocado na quina, o que não foi verificado experimentalmente. Provavelmente, essa diferença decorre do posicionamento e da fixação do DR.

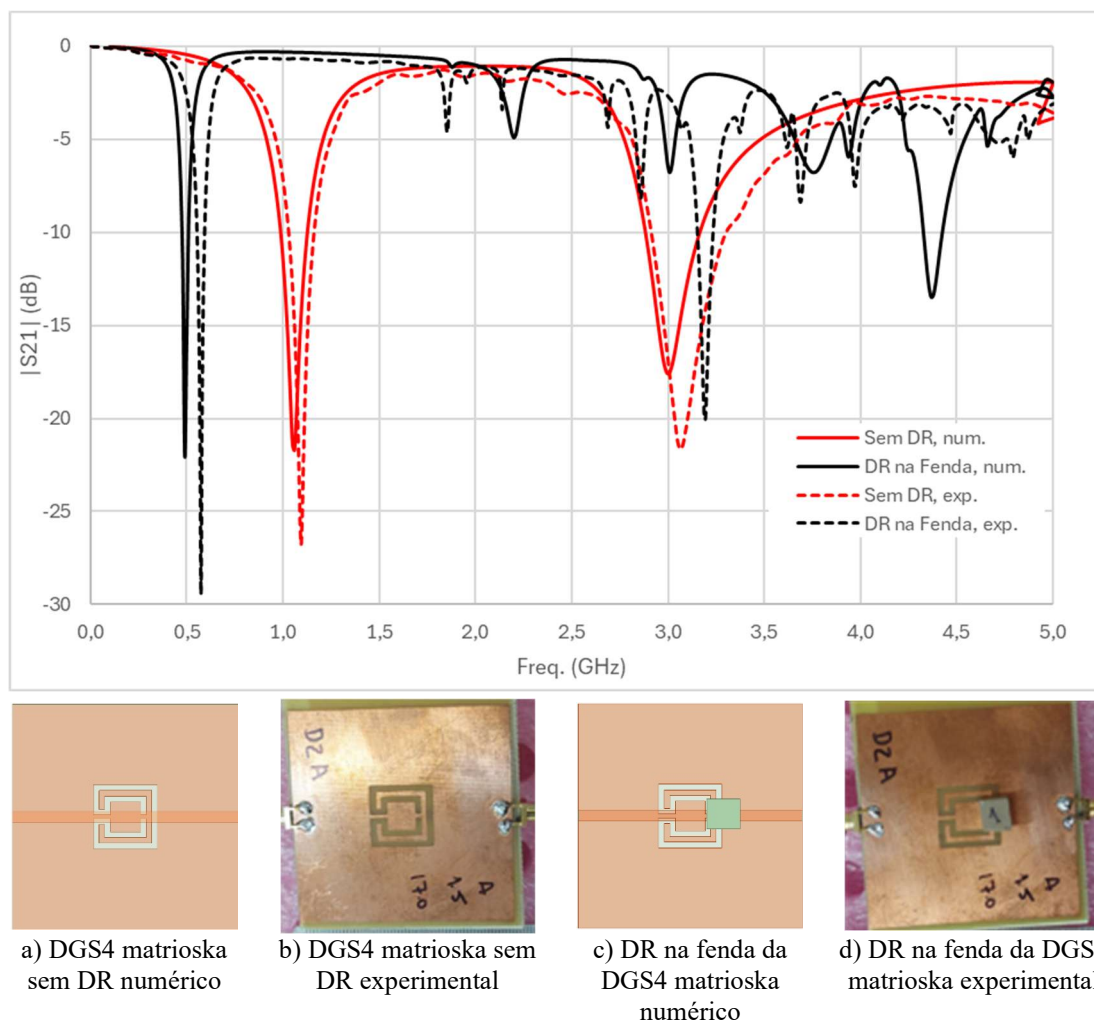


Figura 40 – Resposta em frequência da DGS4 matrioska de anel aberto e miniaturas numéricas e experimentais sem DR e DR na fenda da DGS (vista inferior).

Fonte: Autor.

Por fim, para situação com DR na fenda da DGS4, a frequência de ressonância para forma experimental apresentou uma redução de 47,71% e, na forma numérica apresentou uma redução de 53,77%, comparando a DGS na forma numérica com a

experimental, foi observado uma diferença de 14,04% na frequência de ressonância. Comparando as larguras de banda, calculadas em -10 dB , na forma experimental apresentou uma redução de 69,23%, enquanto na forma numérica apresentou uma redução de 71,43% onde foi possível observar maior seletividade para forma numérica. Esses valores são resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo dos resultados obtidos para DGS4

	DGS4	DGS4_{DR Centro}	DGS4_{DR Quina}	DGS4_{DR Fenda}
$(dpx \times dpy)(mm \times mm)$	–	$0,0 \times 0,0$	$-6,5 \times 7,0$	$0,5 \times 9,0$
$f_{res.calc.}(GHz)$	1,10	–	–	–
$f_{res.num.}(GHz)$	1,06	1,02	0,46	0,49
$f_{res.exp.}(GHz)$	1,09	1,06	0,55	0,57
$\frac{((f_{res.calc.} - f_{res.num.}) \times 100\%)}{f_{res.num.}}$	3,55%	–	–	–
$\frac{((f_{res.calc.} - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	0,70%	–	–	–
$\frac{((f_{res.num.} - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	–2,50%	–	–	–
$\frac{((f_{res.num.}DR - f_{res.num.}) \times 100\%)}{f_{res.num.}}$	–	–2,75%	–49,54%	–47,71%
$\frac{((f_{res.exp.}DR - f_{res.exp.}) \times 100\%)}{f_{res.exp.}}$	–	–3,77%	–16,36%	–14,04%
$BW_{num.}(-10dB)(GHz)$	0,14	0,14	0,03	0,04
$BW_{exp.}(-10dB)(GHz)$	0,13	0,12	0,02	0,04
$\frac{((BW_{num.}DR - BW_{num.}) \times 100\%)}{BW_{num.}}$	–	–7,69%	–84,62%	–69,23%
$\frac{((BW_{exp.}DR - BW_{exp.}) \times 100\%)}{BW_{exp.}}$	–	–66,67%	–50%	–0,00%
NCS	$0,061\lambda_0$ $\times 0,061\lambda_0$ $\times 0,005\lambda_0$	$0,060\lambda_0$ $\times 0,060\lambda_0$ $\times 0,023\lambda_0$	$0,035\lambda_0$ $\times 0,036\lambda_0$ $\times 0,012\lambda_0$	$0,034\lambda_0$ $\times 0,039\lambda_0$ $\times 0,012\lambda_0$

As Tabelas 6 a 9, apresentam resultados analisados das DGS1 a DGS4 a partir das Figuras 29 a 40.

Tabela 6 – Resultados para DGS sem DR

	$f_{res.calc.}(GHz)$	$f_{res.num.}(GHz)$	$f_{res.exp.}(GHz)$	$\frac{dif. \%}{f_{res.} \left(\frac{calc.}{exp.} \right)}$	$\frac{dif. \%}{f_{res.} \left(\frac{num.}{exp.} \right)}$	$BW_{num.}(-10 dB)(GHz)$	$BW_{exp.}(-10 dB)(GHz)$	$\frac{dif. \%}{BW \left(\frac{num.}{exp.} \right)}$
DGS1	1,83 GHz	1,62 GHz	1,55 GHz	18,03 %	4,52 %	0,18 GHz	0,18 GHz	0,00 %
DGS2	1,44 GHz	1,32 GHz	1,36 GHz	6,20 %	–2,94%	0,17 GHz	0,16 GHz	6,25 %
DGS3	1,25 GHz	1,17 GHz	1,20 GHz	3,94 %	–2,50%	0,15GHz	0,15 GHz	0,00 %
DGS4	1,10 GHz	1,06 GHz	1,09 GHz	0,70 %	–2,75 %	0,14 GHz	0,13 GHz	7,69 %

Dessa maneira, ao observar inicialmente os valores apresentados na Tabela 6 (DGS sem DR), constatou-se uma boa concordância entre as frequências de ressonância numérica e experimental. Comparando as frequências de ressonância calculada com a frequência de ressonância da forma experimental, a DGS1 destaca-se das demais apresentando uma diferença de 18,03%, enquanto as outras DGSs apresentaram uma boa concordância entre as frequências de ressonância calculadas e experimentais. Como dito anteriormente, esse resultado é esperado, pois para dimensões menores a expressão para o cálculo da frequência de ressonância é menos precisa. Por outro lado, observa-se uma boa concordância para os resultados da largura de banda, com uma diferença máxima de 7,69%, para a DGS4.

Tabela 7 – Resultados para as DGSs com DR no Centro

	$f_{res.num.}$ (GHz)	$f_{res.exp.}$ (GHz)	$diff. \%$ $\left(\frac{f_{res.num.}}{f_{res.exp.}}\right)$	$BW_{num.}$ -10 dB (GHz)	$BW_{exp.}$ -10 dB (GHz)	$diff. \%$ $\left(\frac{BW_{num.}}{BW_{exp.}}\right)$
DGS1	1,00 GHz	1,27 GHz	-21,26 %	0,03 GHz	0,09 GHz	-66,67 %
DGS2	0,90 GHz	1,14 GHz	-21,05%	0,11 GHz	0,08 GHz	-50,00 %
DGS3	1,08 GHz	1,16 GHz	-6,90%	0,12GHz	0,14 GHz	-14,29 %
DGS4	1,02 GHz	1,06 GHz	-3,77 %	0,14 GHz	0,12 GHz	16,67 %

Observando os resultados apresentados na Tabela 7, constatou-se que com a adição do DR no centro das DGSs a interação com campo eletromagnético produziu uma variação em suas frequências de ressonância, sendo essa variação para a DGS de menor dimensão. Além disso, ao observar as larguras de banda em -10 dB e comparando-as, verifica-se uma boa concordância entre os valores numéricos e experimentais.

Tabela 8 – Resultados para as DGSs com DR na Quina

	$f_{res.num.}$ (GHz)	$f_{res.exp.}$ (GHz)	$diff. \%$ $\left(\frac{f_{res.num.}}{f_{res.exp.}}\right)$	$BW_{num.}$ -10 dB (GHz)	$BW_{exp.}$ -10 dB (GHz)	$diff. \%$ $\left(\frac{BW_{num.}}{BW_{exp.}}\right)$
DGS1	0,61 GHz	0,72 GHz	-15,28 %	0,02 GHz	0,03 GHz	-33,33 %
DGS2	0,64 GHz	0,63 GHz	1,59%	0,03 GHz	0,03 GHz	0,00 %
DGS3	0,48 GHz	0,68 GHz	-29,41%	0,02GHz	0,04 GHz	-50,00 %
DGS4	0,46 GHz	0,55 GHz	-16,36 %	0,03 GHz	0,02 GHz	50,00 %

Para Tabela 8, ao posicionar o DR na quina do DGS, foi possível observar uma maior interação com o campo para as DGSs, pois as frequências de ressonância

apresentaram uma redução considerável. Entretanto, verificou-se uma maior diferença entre os resultados numéricos e experimentais.

Tabela 9 – Resultados para as DGSs com DR na Fenda

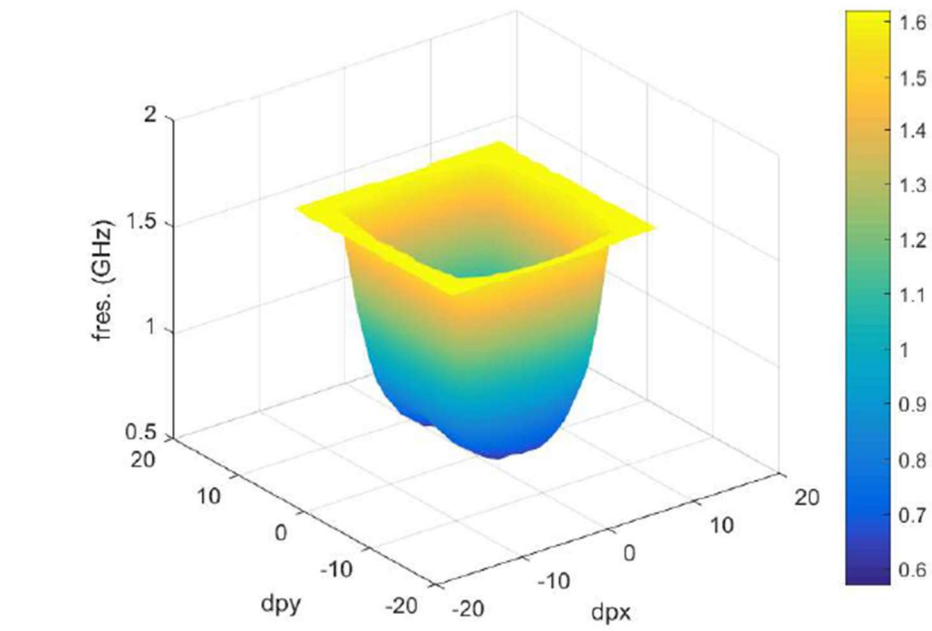
	$f_{res.num.}$ (GHz)	$f_{res.exp.}$ (GHz)	$diff. \%$ $\left(\frac{f_{res.num.}}{f_{res.exp.}}\right)$	$BW_{num.}$ -10 dB (GHz)	$BW_{exp.}$ -10 dB (GHz)	$diff. \%$ $\left(\frac{BW_{num.}}{BW_{exp.}}\right)$
DGS1	0,62 GHz	0,74 GHz	-16,22 %	0,03 GHz	0,03 GHz	0 %
DGS2	0,75 GHz	0,74 GHz	1,35%	0,05 GHz	0,05 GHz	0 %
DGS3	0,60 GHz	0,68 GHz	-11,76%	0,05GHz	0,05 GHz	0 %
DGS4	0,49 GHz	0,57 GHz	-14,04 %	0,04 GHz	0,04 GHz	0 %

De maneira geral foi possível observar que as DGSs com DR na fenda apresentaram uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, tanto para a frequência de ressonância, como para a largura de banda.

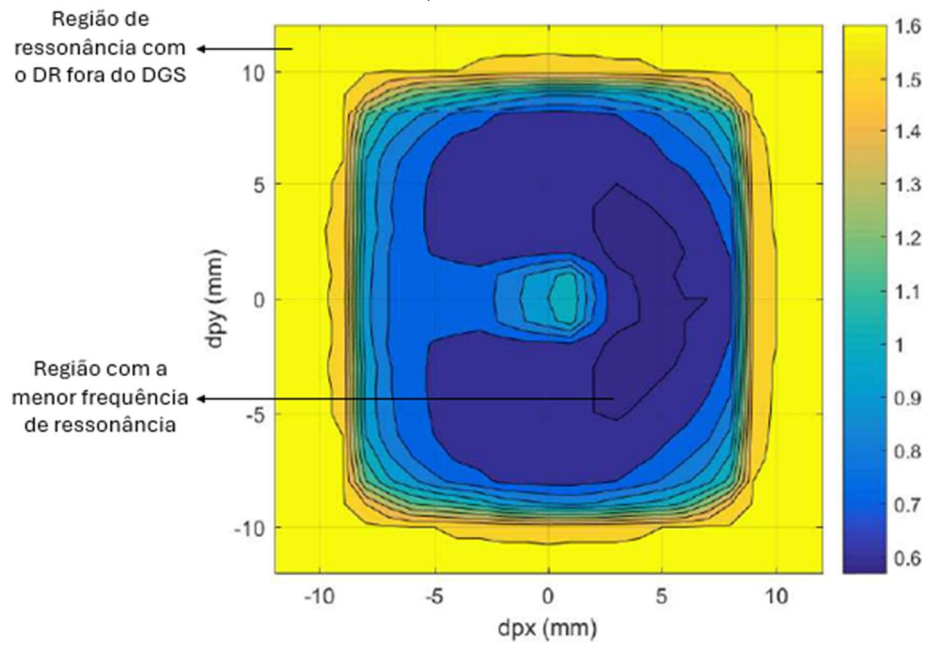
3.2.Análise do Efeito na Resposta em Frequência da Posição do DR na DGS-matrioska de Anel Aberto

As Figuras 41 e 42, ilustram como a variação da posição do DR, (dpx, dpy), afeta a frequência de ressonância das DGSs, tendo sido consideradas as DGS1 e DGS3, com o objetivo de avaliar o a variação da frequência de ressonância em uma DGS com dimensões reduzidas e com outra de maiores dimensões.

Para a DGS1, de menores dimensões, Fig. 41, observa-se que a região das quinas e das fendas são praticamente uma só. Isto ocorre porque as dimensões do DR são comparáveis às dimensões da DGS1. Por outro lado, para a DGS3, de maiores dimensões, Fig. 42, observa-se que a região das quinas se separa da região das fendas.



a) Vista isométrica



b) Vista superior

Figura 41 –Variação da frequência de ressonância em função da posição (dpx, dpy) do DR na DGS1.

Fonte: Autor.

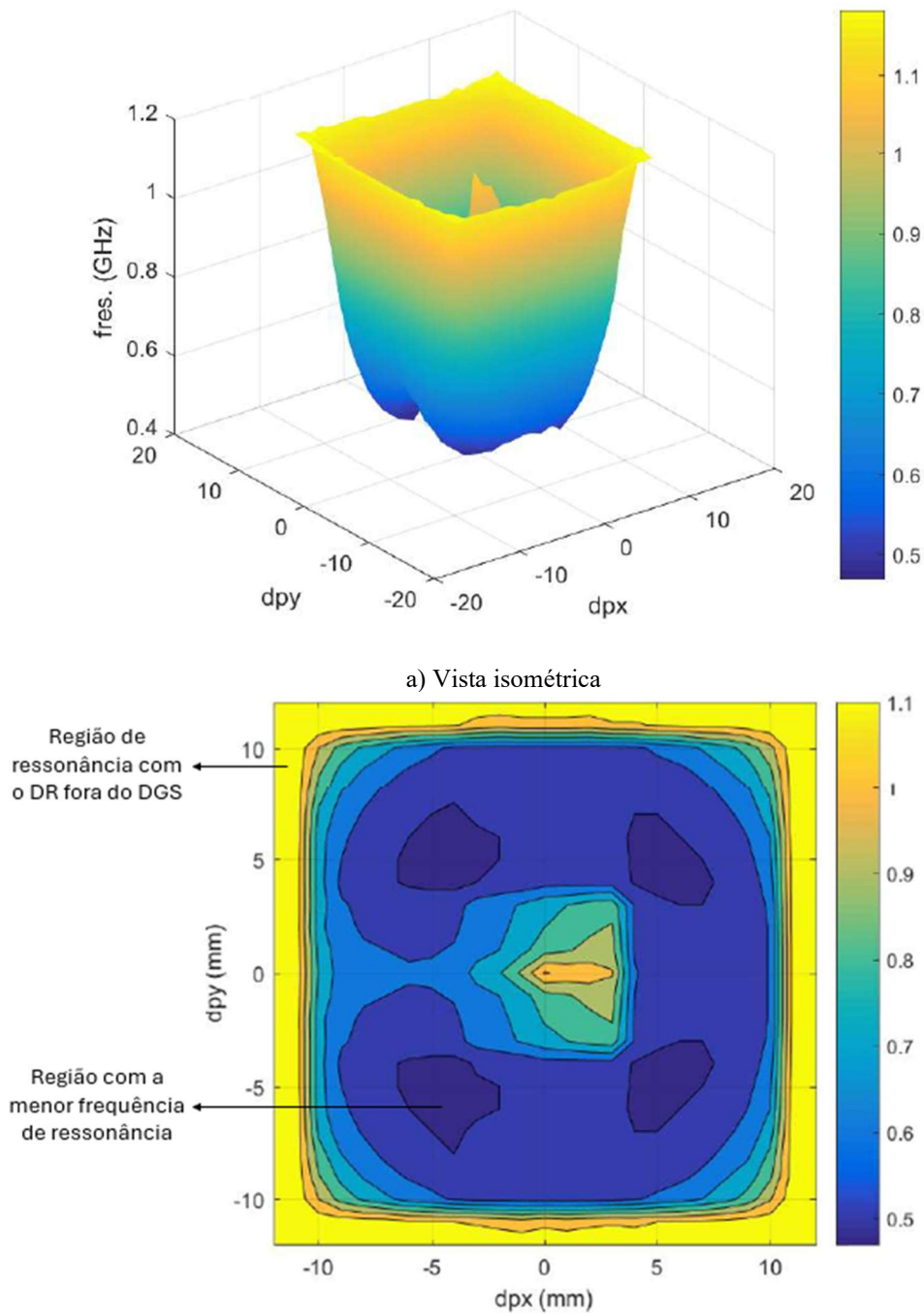


Figura 42 –Variação da frequência de ressonância em função da posição (dpx, dpy) do DR na DGS3.

Fonte: Autor.

3.3. Análise da Densidade de Corrente dos Filtros DGS-matrioska de anel aberto

Outro ponto interessante a se analisar é a densidade de corrente, com a finalidade de verificar o efeito do DR de acordo com sua posição na DGS-matrioska de anel aberto. Dessa maneira, foram realizadas simulações onde nas DGS1 e DGS4 foram consideradas quatro situações, uma sem a presença do DR, com o DR posicionado no centro do filtro, com o DR posicionado na quina do filtro e por fim com o DR posicionado na fenda do DGS. Para cada situação, foram consideradas três frequências: a frequência que antecede a frequência de ressonância, a frequência de ressonância e outra frequência após a frequência de ressonância.

3.3.1. Densidade de corrente da DGS1

Nas Figuras 43 a 46 são apresentados os resultados obtidos para a densidade de corrente da DGS1. Para as frequências anterior e posterior à frequência de ressonância, Figuras 43(a), 43(c), 44(a), 44(c), 45(a) e 45(c), verifica-se que o sinal está presente antes e depois da DGS. Por outro lado, na frequência de ressonância, Figuras 43(b), 44(b) e 45(b), praticamente o sinal está presente em apenas um lado da DGS, indicando que ficou bloqueado. Diante deste ponto, confirmou-se o funcionamento da DGS-matrioska de anel aberto, como um filtro rejeita-faixa. Além disso, ao fazer o comparativo entre as diferentes posições do DR, foi observado que para as posições centro e fenda, a densidade de corrente é simétrica. Já para a posição quina, a densidade de corrente é assimétrica, deslocada na direção do DR. Esse efeito é especialmente visível para a frequência após a ressonância, Figura 45(c).

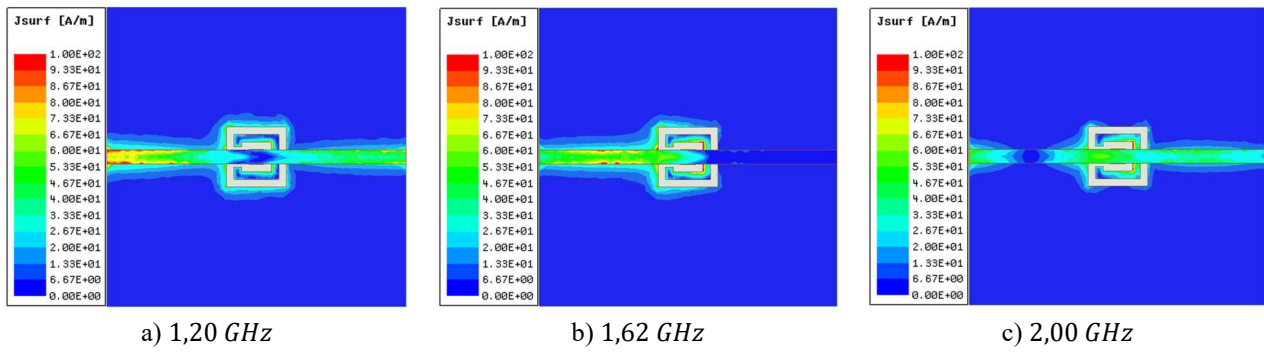


Figura 43 – Densidade de corrente da DGS1 sem a presença do DR.

Fonte: Autor.

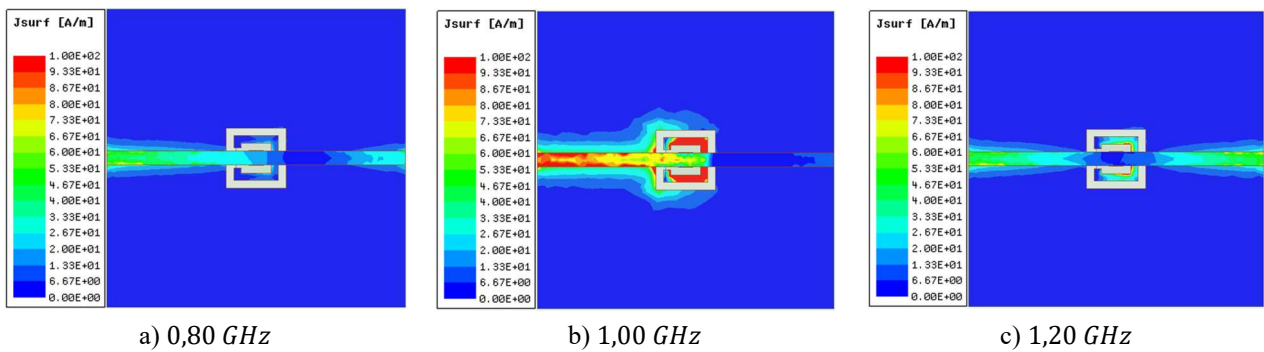


Figura 44 – Densidade de corrente da DGS1 com DR posicionado no centro.

Fonte: Autor.

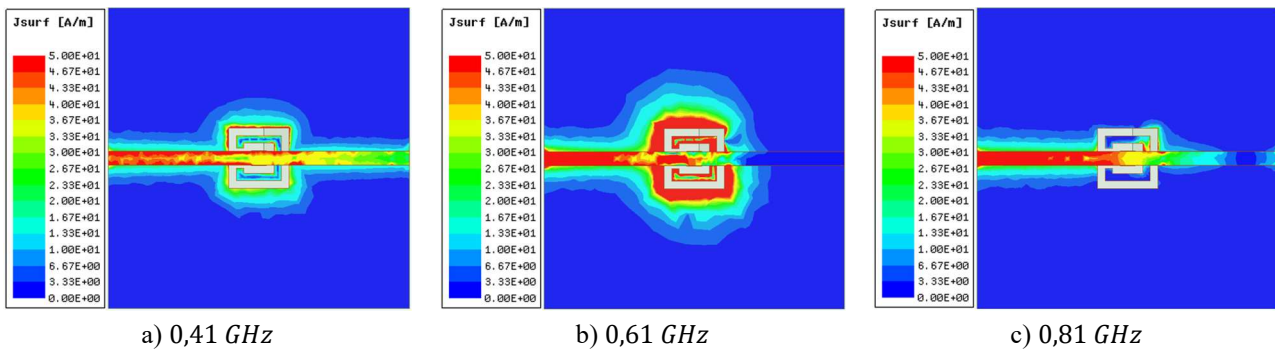


Figura 45 – Densidade de corrente da DGS1 com DR posicionado na quina.

Fonte: Autor.

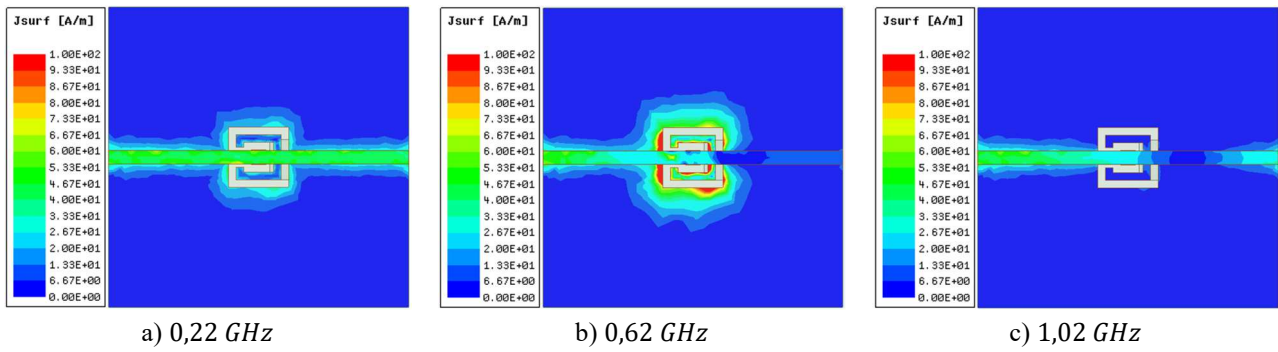


Figura 46 – Densidade de corrente da DGS1 com DR posicionado na fenda.

Fonte: Autor.

3.3.2. Densidade de corrente da DGS4

Nas Figuras 47 a 50 são apresentados os resultados obtidos para a densidade de corrente da DGS4. A análise de resultados é similar à DGS1.

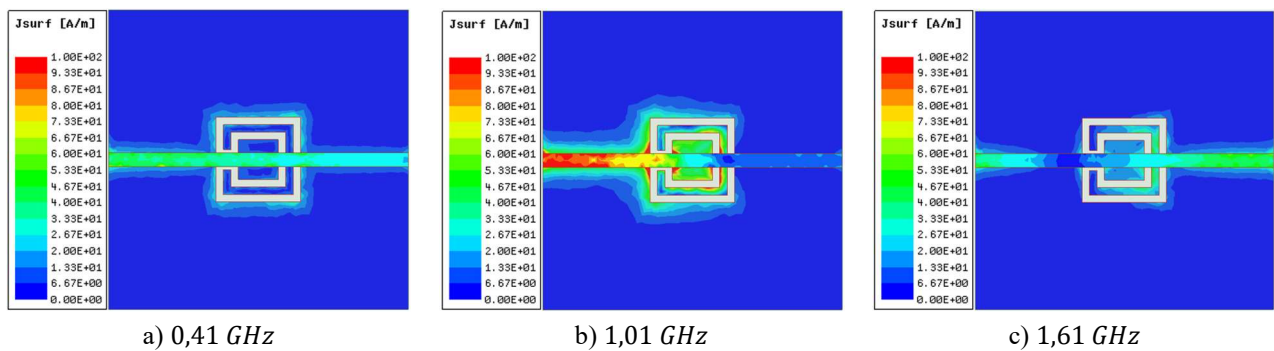


Figura 47 – Densidade de corrente da DGS4 sem a presença do DR

Fonte: Autor.

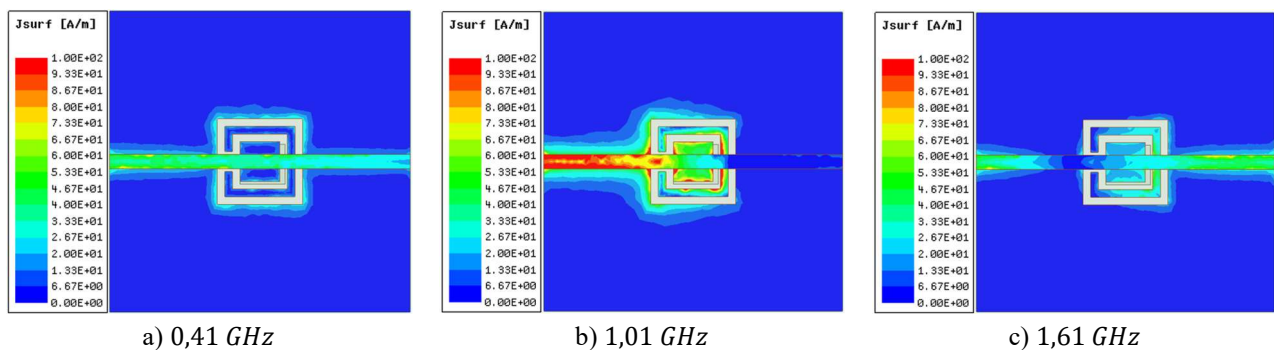


Figura 48 – Densidade de corrente da DGS4 com DR posicionado no centro.

Fonte: Autor.

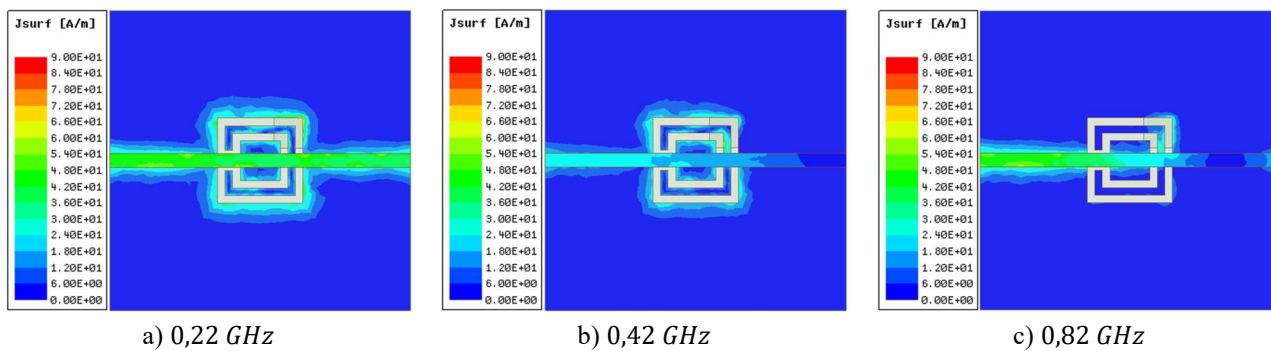


Figura 49 – Densidade de corrente da DGS4 com DR posicionado na quina.

Fonte: Autor.

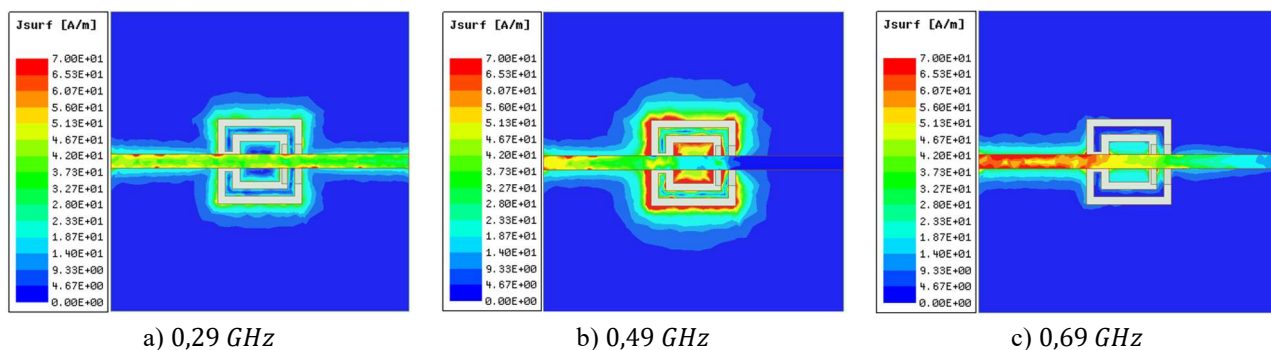


Figura 50 – Densidade de corrente da DGS4 com DR posicionado na fenda.

Fonte: Autor.

4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE A DGS-MATRIOSKA DE ANEL ABERTO E DGS-MATRIOSKA DE ANEL FECHADO

Este capítulo tem como objetivo comparar o comportamento da frequência de ressonância e largura de banda, das DGS-matrioska de anel aberto e DGS-matrioska de anel fechado [38].

4.1. DGSs-matrioska sem a presença do DR

Analisando inicialmente os dados apresentados na DGS1 de anel fechado sem a presença do DR, foi observado que a frequência de ressonância na forma numérica foi de 3,84 GHz e 3,56 GHz na experimental com uma diferença de 2,13% para a frequência de ressonância calculada. Observando a DGS1 de anel aberto, foi possível verificar que a frequência de ressonância na forma numérica foi de 1,62 GHz e 1,55 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou uma diferença de 18,03% da forma experimental para frequência de ressonância calculada.

Agora observando as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, a DGS1 de anel fechado uma largura de banda de 1,02 GHz na forma numérica e 2,68 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou uma diferença de 61,90% entre suas larguras de banda numérica e experimental. No entanto ao observar as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, a DGS1 de anel aberto a largura de banda de 0,18 GHz na forma numérica e 0,18 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou uma diferença de 0% entre suas larguras de banda numérica e experimental. Esses valores são resumidos na Tabela 10.

Observando agora os valores apresentados para DGS2 de anel fechado e DGS2 de anel aberto sem a presença do DR, a frequência de ressonância na forma numérica foi de 2,71 GHz e 2,74 GHz na forma experimental, onde apresentou uma diferença de 5%, da frequência de ressonância calculada para experimental. Observando a DGS2 de anel aberto, foi possível verificar que a frequência de ressonância na forma numérica foi de 1,32 GHz e 1,36 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou uma diferença de 6,20% da forma experimental para frequência de ressonância calculada.

Para as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, observou-se que a DGS2 de anel fechado apresentou uma largura de banda de 0,78 GHz na forma numérica e 0,88 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou uma diferença de 11,30% entre suas larguras de banda numérica e experimental. No entanto ao observar a DGS2 de anel aberto verificou-se uma largura de banda de 0,17 GHz na forma numérica e 0,16 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou uma diferença de 6,25% entre suas larguras de banda numérica e experimental. Esses valores são resumidos na Tabela 10.

Para os resultados apresentados para DGS3 de anel fechado e DGS3 de anel aberto sem a presença do DR, a frequência de ressonância na forma numérica foi de 2,25 GHz e 2,29GHz na forma experimental, onde apresentou uma diferença de 8%, da frequência de ressonância calculada para experimental. Observando a DGS3 de anel aberto, foi possível verificar que a frequência de ressonância na forma numérica foi de 1,17 GHz e 1,20 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou uma diferença de 3,94% da forma experimental para frequência de ressonância calculada.

Observando agora as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, observou-se que a DGS3 de anel fechado apresentou uma largura de banda de 0,65 GHz na forma numérica e 0,76 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou uma diferença de 14,47% entre suas larguras de banda numérica e experimental. No entanto ao observar a DGS3 de anel aberto verificou-se uma largura de banda de 0,15 GHz na forma numérica e 0,15 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou 0% de diferença entre suas larguras de banda numérica e experimental. Esses valores são resumidos na Tabela 10.

Observando a DGS4 de anel fechado e DGS4 de anel aberto sem a presença do DR, a frequência de ressonância na forma numérica foi de 1,94 GHz e 1,98 GHz na forma experimental, onde apresentou uma diferença de 10%, da frequência de ressonância calculada para experimental. Observando a DGS3 de anel aberto, foi possível verificar que a frequência de ressonância na forma numérica foi de 1,06 GHz e 1,09 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou uma diferença de 0,70% da forma experimental para frequência de ressonância calculada.

Para as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, observou-se que a DGS4 de anel fechado apresentou uma largura de banda de 0,55 GHz na forma numérica

e 0,57 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou uma diferença de 2,63% entre suas larguras de banda numérica e experimental. No entanto ao observar a DGS3 de anel aberto verificou-se uma largura de banda de 0,14 GHz na forma numérica e 0,13 GHz na forma experimental, onde por sua vez apresentou 7,69% de diferença entre suas larguras de banda numérica e experimental. Esses valores são resumidos na Tabela 10.

Como esperado, a frequência de ressonância da DGS-matrioska anel aberto é aproximadamente a metade da DGS-matrioska anel fechado. Entretanto, para a largura da banda de rejeição não é possível fazer a mesma relação.

Tabela 10 – Resultados para as DGSs de anel fechado e DGSs de anel aberto sem DR

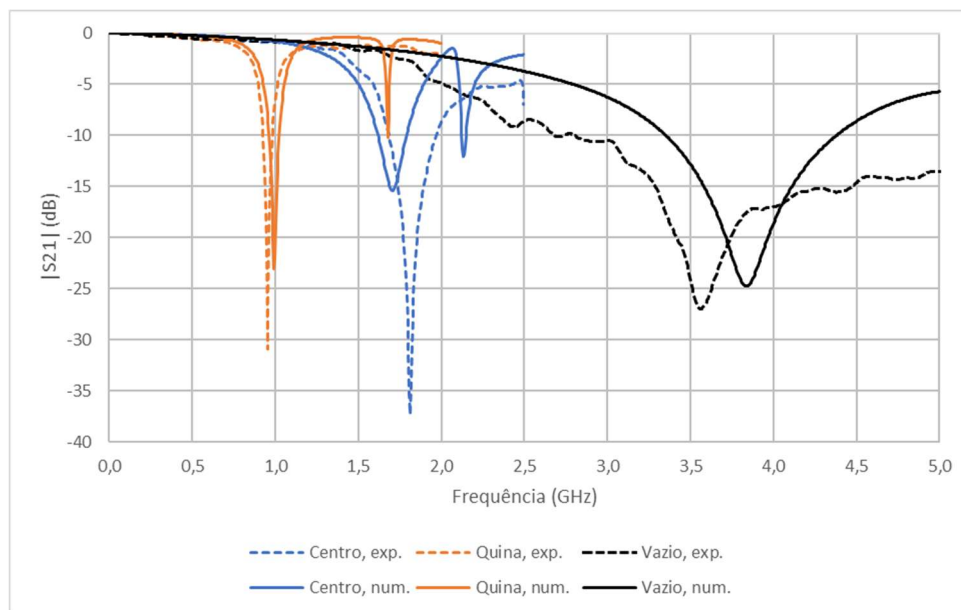
	$f_{res.calc.}$ (GHz)	$f_{res.num.}$ (GHz)	$f_{res.exp.}$ (GHz)	$\frac{dif. \%}{f_{res.}}$ $\left(\frac{calc.}{exp.}\right)$	$\frac{dif. \%}{f_{res.}}$ $\left(\frac{num.}{exp.}\right)$	$BW_{num.}$ -10 dB (GHz)	$BW_{exp.}$ -10 dB (GHz)	$\frac{dif. \%}{BW}$ $\left(\frac{num.}{exp.}\right)$
DGS1 Anel Fechado	3,64 GHz	3,84 GHz	3,56 GHz	-2,13 %	-7,70 %	1,02 GHz	2,68 GHz	-61,90 %
DGS1 Anel aberto	1,83 GHz	1,62 GHz	1,55 GHz	18,03 %	4,52%	0,18 GHz	0,18 GHz	0,00%
DGS2 Anel Fechado	2,87 GHz	2,71 GHz	2,74 GHz	5,00 %	-0,91 %	0,78 GHz	0,88 GHz	-11,30 %
DGS2 Anel aberto	1,44 GHz	1,32 GHz	1,36 GHz	6,20 %	-2,94%	0,17 GHz	0,16 GHz	6,25%
DGS3 Anel Fechado	2,48 GHz	2,25 GHz	2,29 GHz	8,00 %	-1,96 %	0,65 GHz	0,76 GHz	-14,47 %
DGS3 Anel aberto	1,25 GHz	1,17 GHz	1,20 GHz	3,94 %	-2,50%	0,15 GHz	0,15 GHz	0,00%
DGS4 Anel Fechado	2,18 GHz	1,94 GHz	1,98 GHz	10%	-1,77 %	0,55 GHz	0,57 GHz	-2,63 %
DGS4 Anel aberto	1,10 GHz	1,06 GHz	1,09 GHz	0,70 %	-2,75%	0,14 GHz	0,13 GHz	7,69%

4.2. DGSs-matrioska com DR posicionado no centro

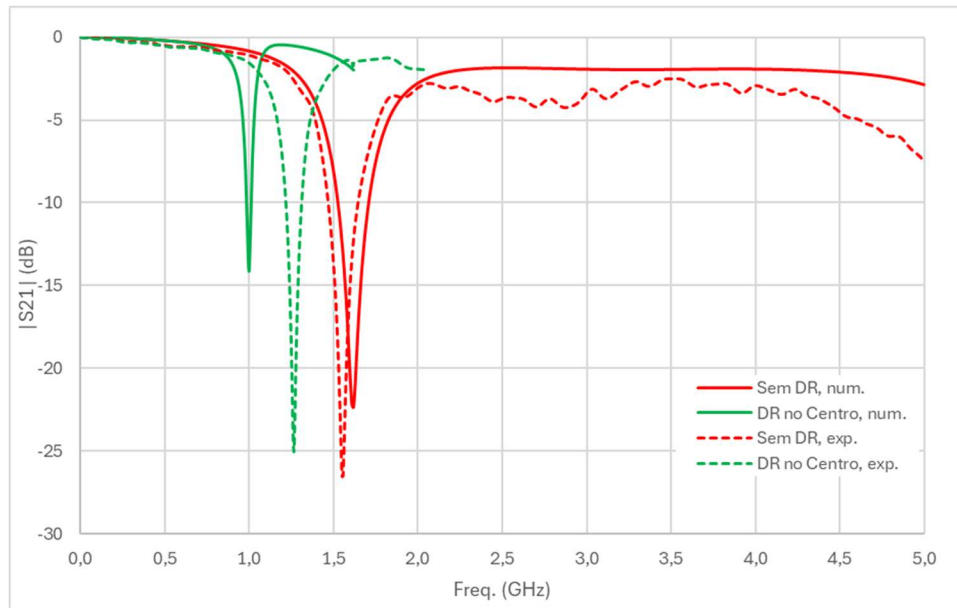
Observando a DGS1 de anel fechado e a DGS1 de anel aberto, com DR posicionado no centro de ambas, foi verificado que a DGS1 de anel fechado na forma numérica apresentou frequência de ressonância de 1,71 GHz e 1,82 GHz na frequência de ressonância na forma experimental, enquanto a DGS1 de anel aberto na forma numérica apresentou uma frequência de ressonância de 1,00 GHz e 1,27 GHz na forma experimental. Dessa maneira a DGS1 de anel fechado apresentou uma redução de 55%

em sua frequência de ressonância na forma numérica e 49% em sua frequência de ressonância na forma experimental quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR, no entanto ao observar o DGS1 de anel aberto, constatou-se que a frequência de ressonância na forma numérica sofreu uma redução de 38,27% e a forma experimental reduziu 18,06% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR.

Além da frequência de ressonância também foram verificadas as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, onde a DGS1 de anel fechado apresentou uma largura de banda de 0,17 GHz na forma numérica e 0,28 GHz na forma experimental, com uma redução de 83% na largura de banda na forma numérica e uma redução de 89% na largura de banda na forma experimental. Enquanto a DGS1 de anel aberto apresentou uma largura de banda de 0,03 GHz na forma numérica e 0,09 GHz na forma experimental, com uma redução de 83,33% na forma numérica e 50% na forma experimental.



a) Resposta em frequência da DGS1 de anel fechado [38]



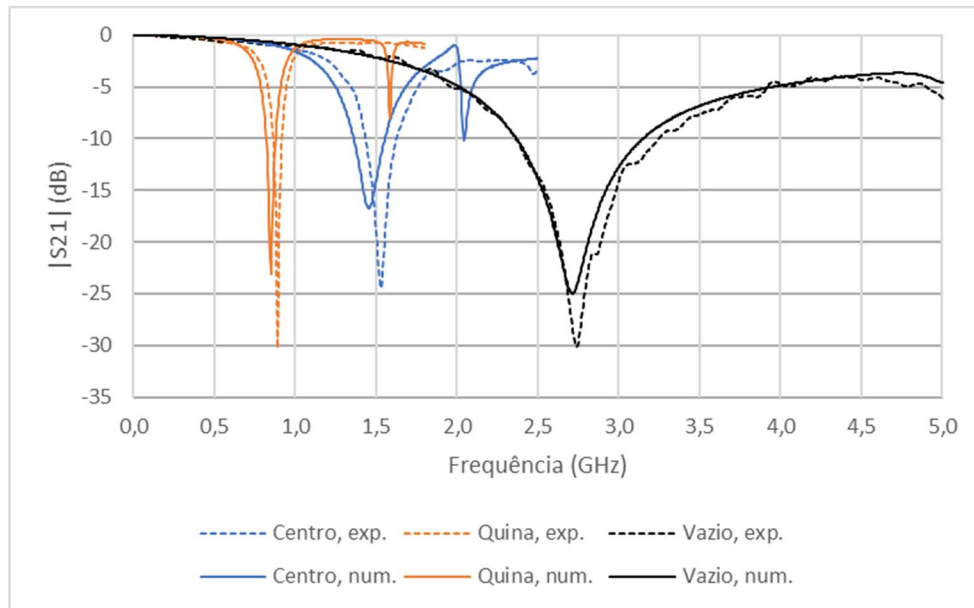
b) Resposta em frequência da DGS1 de anel aberto

Figura 51 –Resposta em frequência das DGSs1 de anel fechado e aberto com DR no centro.

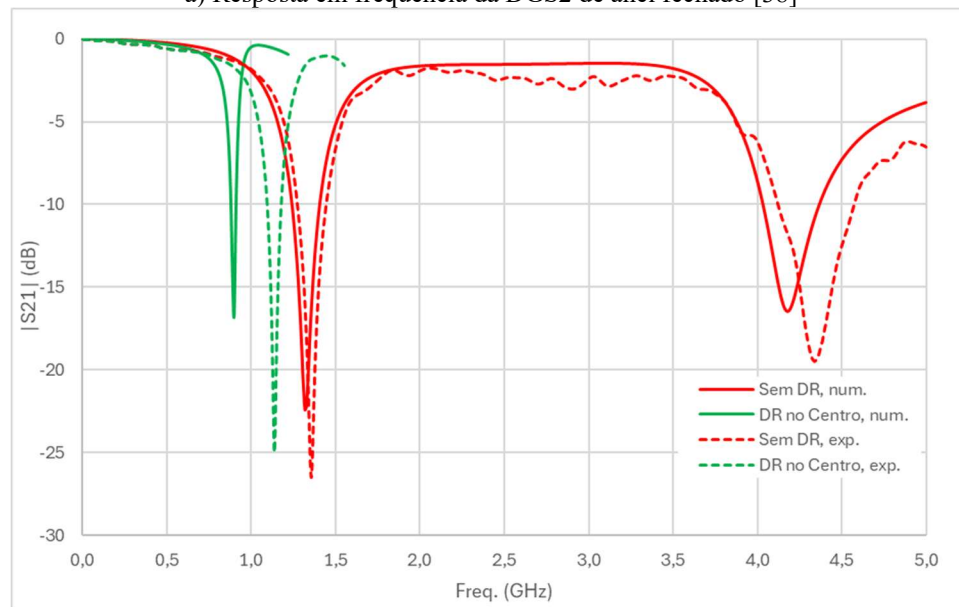
Fonte: Autor.

Observando agora essa mesma configuração para a DGS2 de anel fechado, a frequência de ressonância apresentada na forma numérica foi de 1,46 GHz e 1,53 GHz na frequência de ressonância na forma experimental, já a DGS2 de anel aberto na forma numérica apresentou uma frequência de ressonância de 0,90 GHz e 1,14 GHz na forma experimental. Onde por sua vez a DGS2 de anel fechado apresentou uma redução de 46% em sua frequência de ressonância na forma numérica e 44% em sua frequência de ressonância na forma experimental quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR. Ao observar o DGS2 de anel aberto, verificou-se que a frequência de ressonância na forma numérica sofreu uma redução de 31,82% e a forma experimental reduziu 16,18% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR.

Para as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, a DGS2 de anel fechado apresentou uma largura de banda de 0,19 GHz na forma numérica e 0,19 GHz na forma experimental, com uma redução de 76% na largura de banda na forma numérica e uma redução de 79% na largura de banda na forma experimental. Enquanto a DGS2 de anel aberto apresentou uma largura de banda de 0,04 GHz na forma numérica e 0,08 GHz na forma experimental, com uma redução de 76,47% na forma numérica e 50% na forma experimental.



a) Resposta em frequência da DGS2 de anel fechado [38]



b) Resposta em frequência da DGS2 de anel aberto

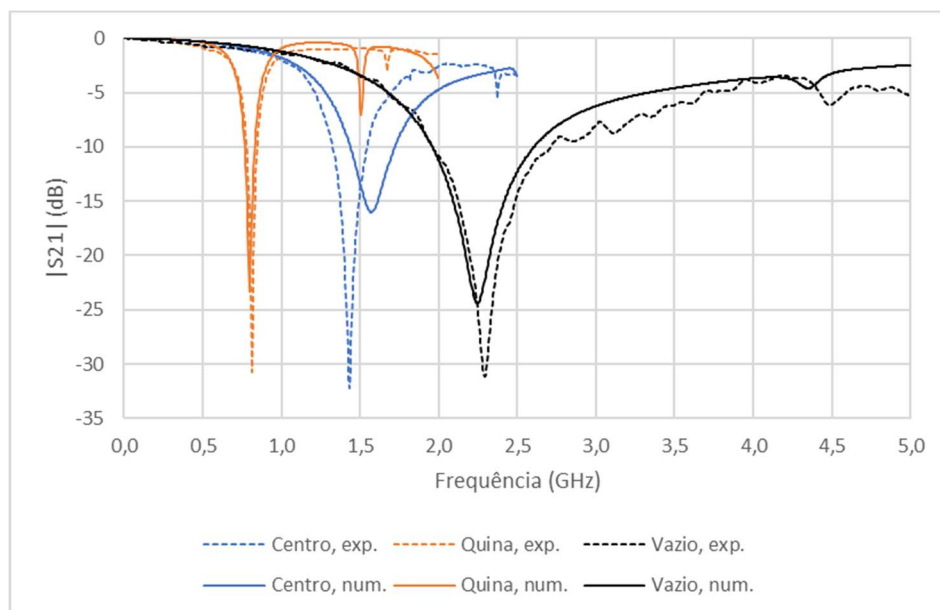
Figura 52 –Resposta em frequência das DGSs2 de anel fechado e aberto com DR no centro.

Fonte: Autor.

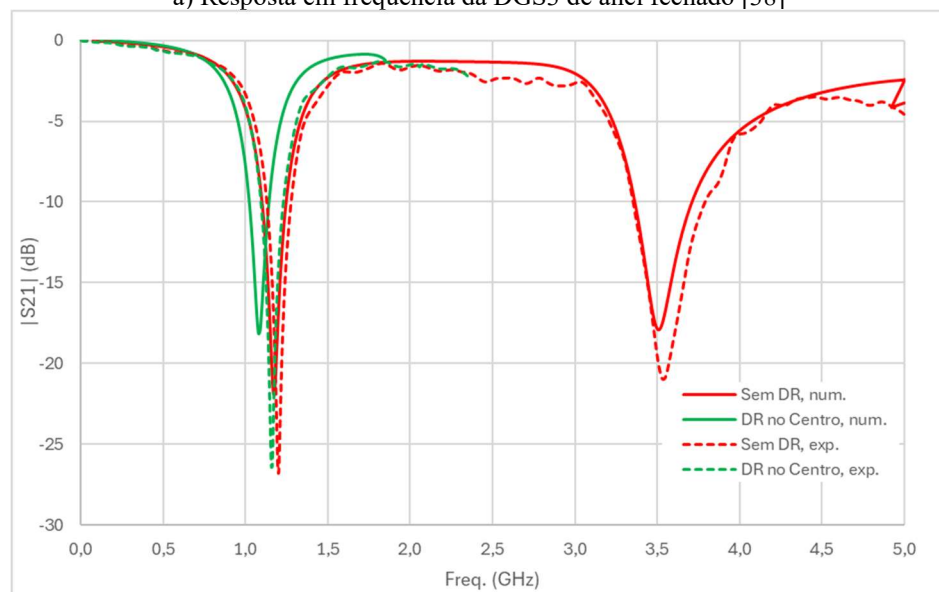
Para a DGS3 de anel fechado, a frequência de ressonância apresentada na forma numérica foi de 1,58 GHz e 1,44 GHz na frequência de ressonância na forma experimental, já a DGS3 de anel aberto na forma numérica apresentou uma frequência de ressonância de 1,08 GHz e 1,16 GHz na forma experimental. Onde por sua vez a DGS3 de anel fechado apresentou uma redução de 30% em sua frequência de ressonância na forma numérica e 37% em sua frequência de ressonância na forma experimental quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR, observando o DGS3 de anel aberto com DR posicionado no centro, verificou-se que a frequência de ressonância

na forma numérica sofreu uma redução de 7,69% e a forma experimental reduziu 3,33% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR.

Observando as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, observou-se que a DGS3 de anel fechado apresentou uma largura de banda de 0,28 GHz na forma numérica e 0,21 GHz na forma experimental, com uma redução de 56% na largura de banda na forma numérica e uma redução de 72% na largura de banda na forma experimental. Enquanto a DGS3 de anel aberto apresentou uma largura de banda de 0,12 GHz na forma numérica e 0,14 GHz na forma experimental, com uma redução de 20% na forma numérica e 6,67% na forma experimental.



a) Resposta em frequência da DGS3 de anel fechado [38]



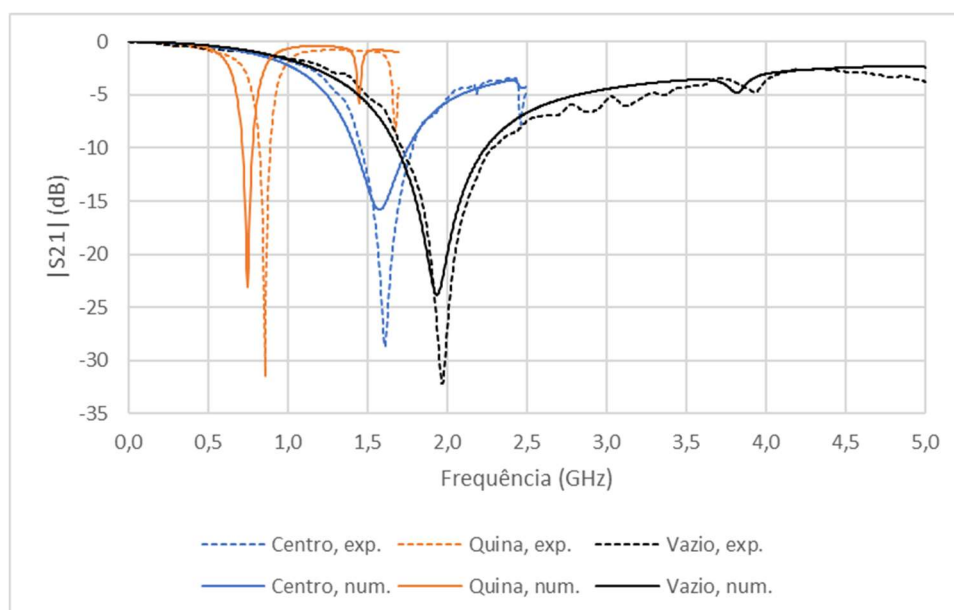
b) Resposta em frequência da DGS3 de anel aberto

Figura 53 –Resposta em frequência das DGSs3 de anel fechado e aberto com DR no centro.

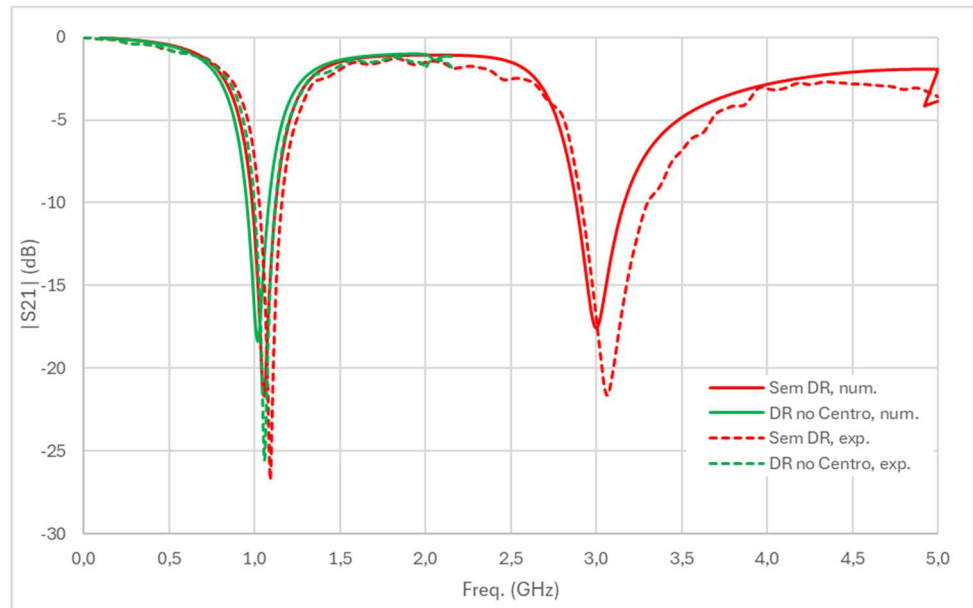
Fonte: Autor.

Por fim observando os resultados apresentados para a DGS4 de anel fechado com DR posicionado no centro, a frequência de ressonância apresentada na forma numérica foi de 1,58 GHz e 1,62 GHz na frequência de ressonância na forma experimental, e a DGS4 de anel aberto na forma numérica apresentou uma frequência de ressonância de 1,02 GHz e 1,06 GHz na forma experimental. A partir disto observou-se que a DGS4 de anel fechado apresentou uma redução de 19% em sua frequência de ressonância na forma numérica e 18% em sua frequência de ressonância na forma experimental quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR, observando o DGS4 de anel aberto, verificou-se que a frequência de ressonância na forma numérica sofreu uma redução de 3,77% e a forma experimental reduziu 2,75% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR.

Além disso, as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, observadas na DGS4 de anel fechado apresentaram respectivamente uma largura de banda de 0,33 GHz na forma numérica e 0,32 GHz na forma experimental, com uma redução de 40% na largura de banda na forma numérica e uma redução de 44% na largura de banda na forma experimental. A DGS4 de anel aberto apresentou uma largura de banda de 0,14 GHz na forma numérica e 0,12 GHz na forma experimental, dessa maneira a forma numérica não apresentou variação na largura de banda, enquanto na forma experimental apresentou uma redução de 7,69%. Esses valores são resumidos nas Tabelas 11.



a) Resposta em frequência da DGS4 de anel fechado [38]



b) Resposta em frequência da DGS4 de anel aberto

Figura 54 –Resposta em frequência das DGSs4 de anel fechado e aberto com DR no centro.

Fonte: Autor.

Tabela 11 – Resultados para as DGSs de anel fechado e anel aberto, com DR no Centro

	$f_{res.num.}$ (GHz)	$f_{res.exp.}$ (GHz)	$\frac{dif. \%}{f_{res.} \left(\frac{num. DR}{num.} \right)}$	$\frac{dif. \%}{f_{res.} \left(\frac{exp. DR}{exp.} \right)}$	$BW_{num.} -10 dB$ (GHz)	$BW_{exp.} -10 dB$ (GHz)	$\frac{dif. \%}{BW \left(\frac{num. DR}{num.} \right)}$	$\frac{dif. \%}{BW \left(\frac{exp. DR}{exp.} \right)}$
DGS1 Anel Fechado	1,71 GHz	1,82 GHz	-55%	-49 %	0,17 GHz	0,28 GHz	-83 %	-89%
DGS1 Anel aberto	1,00 GHz	1,27 GHz	-38,27%	-18,06%	0,03 GHz	0,09 GHz	-83,33%	-50%
DGS2 Anel Fechado	1,46 GHz	1,53 GHz	-46%	-44%	0,19 GHz	0,19 GHz	-76%	-79%
DGS2 Anel aberto	0,90 GHz	1,14 GHz	-31,82%	-16,18%	0,04 GHz	0,08 GHz	-76,47%	-50%
DGS3 Anel Fechado	1,58 GHz	1,44 GHz	-30%	-37%	0,28 GHz	0,21 GHz	-56%	-72%
DGS3 Anel aberto	1,08 GHz	1,16 GHz	-7,69%	-3,33%	0,12 GHz	0,14 GHz	-20%	-6,67%
DGS4 Anel Fechado	1,58 GHz	1,62 GHz	-19%	-18%	0,33 GHz	0,32 GHz	-40%	-44%
DGS4 Anel aberto	1,02 GHz	1,06 GHz	-3,77%	-2,75%	0,14 GHz	0,12 GHz	-0,00%	-7,69%

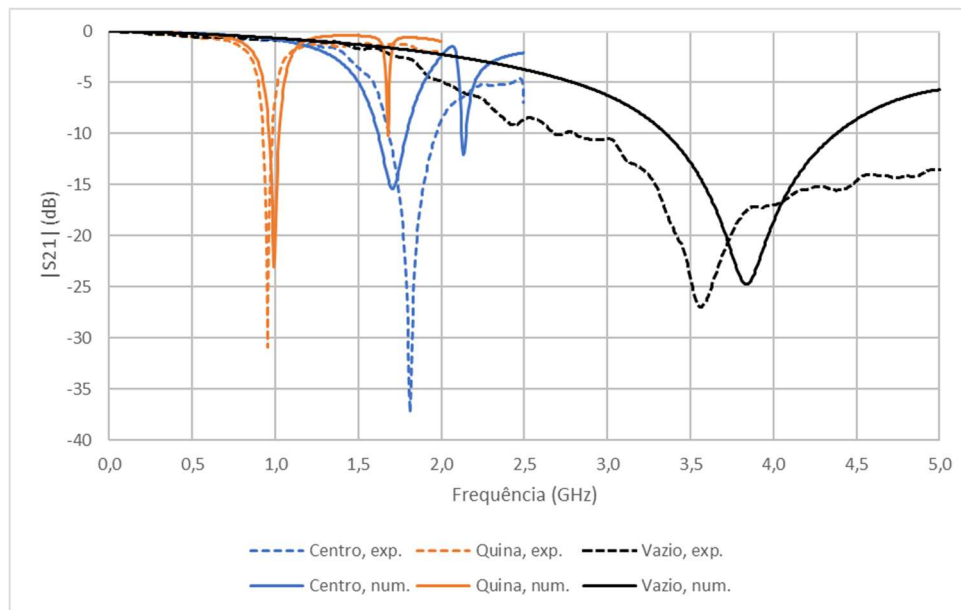
A partir dos resultados apontados na Tabela 11 foi possível observar que as DGSs-matrioska de anel fechado com DR posicionado no centro da DGS, apresentaram maior redução percentual da frequência de ressonância, quando comparadas as DGSs-matrioska

anel aberto. Por outro lado, as reduções nas larguras de banda foram maiores para as DGSs-matroska de anel aberto.

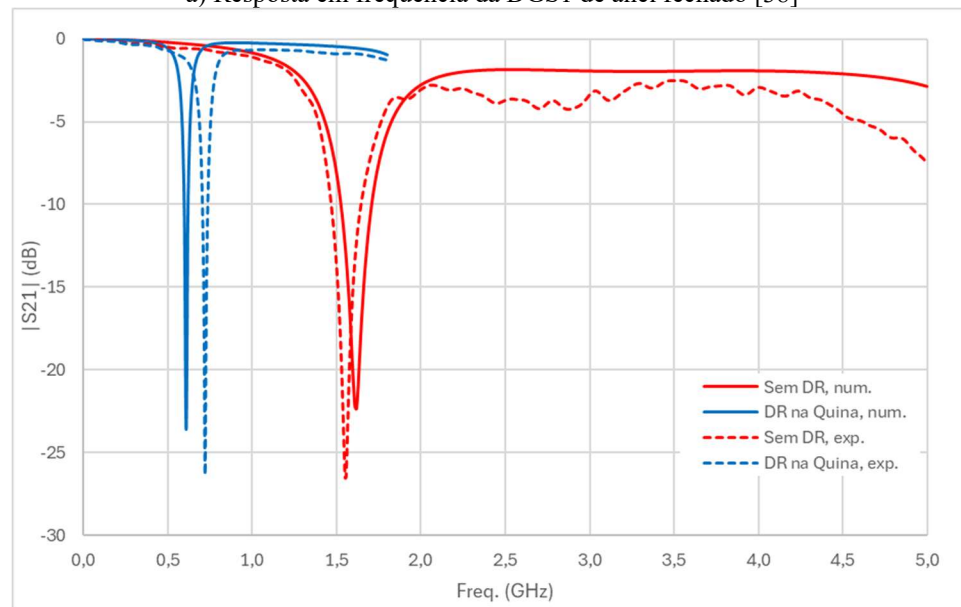
4.3. DGSs-matroska com DR posicionado na quina

Para situação com DR posicionado na quina das DGSs, a DGS1 de anel fechado na forma numérica apresentou frequência de ressonância de 0,99 GHz e 0,96 GHz na frequência de ressonância na forma experimental, enquanto a DGS1 de anel aberto na forma numérica apresentou uma frequência de ressonância de 0,61 GHz e 0,72 GHz na forma experimental. Dessa maneira a DGS1 de anel fechado apresentou uma redução de 74% em sua frequência de ressonância na forma numérica e 73% em sua frequência de ressonância na forma experimental quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR, no entanto ao observar o DGS1 de anel aberto, constatou-se que a frequência de ressonância na forma numérica sofreu uma redução de 62,35% e a forma experimental reduziu 53,55% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR.

Observando agora as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, a DGS1 de anel fechado apresentou uma largura de banda de 0,06 GHz na forma numérica e 0,05 GHz na forma experimental, com uma redução de 94% na largura de banda na forma numérica e uma redução de 98% na largura de banda na forma experimental. Enquanto a DGS1 de anel aberto apresentou uma largura de banda de 0,02 GHz na forma numérica e 0,03 GHz na forma experimental, com uma redução de 88,89% na forma numérica e 83,33% na forma experimental.



a) Resposta em frequência da DGS1 de anel fechado [38]



b) Resposta em frequência da DGS1 de anel aberto

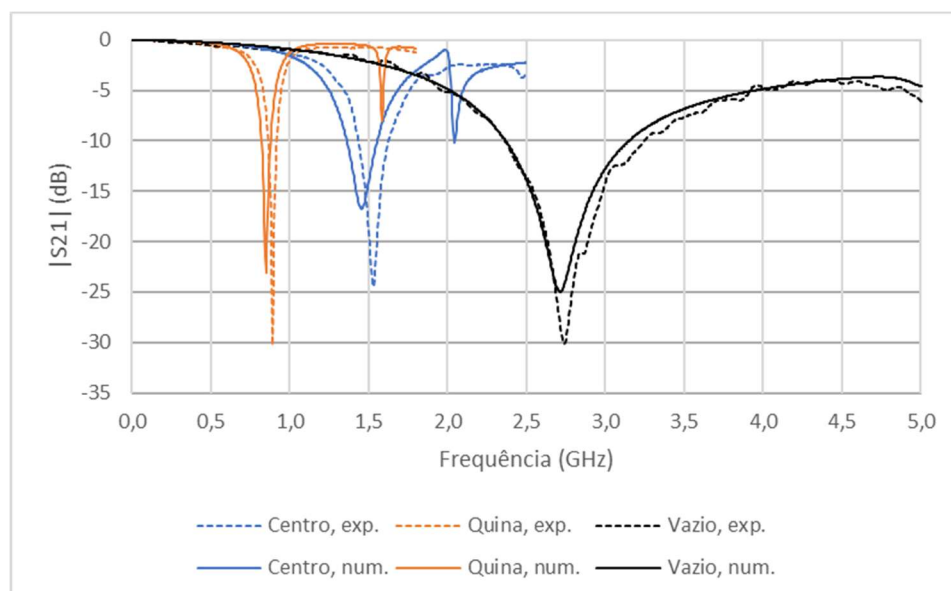
Figura 55 –Resposta em frequência das DGSs1 de anel fechado e aberto com DR na quina.

Fonte: Autor.

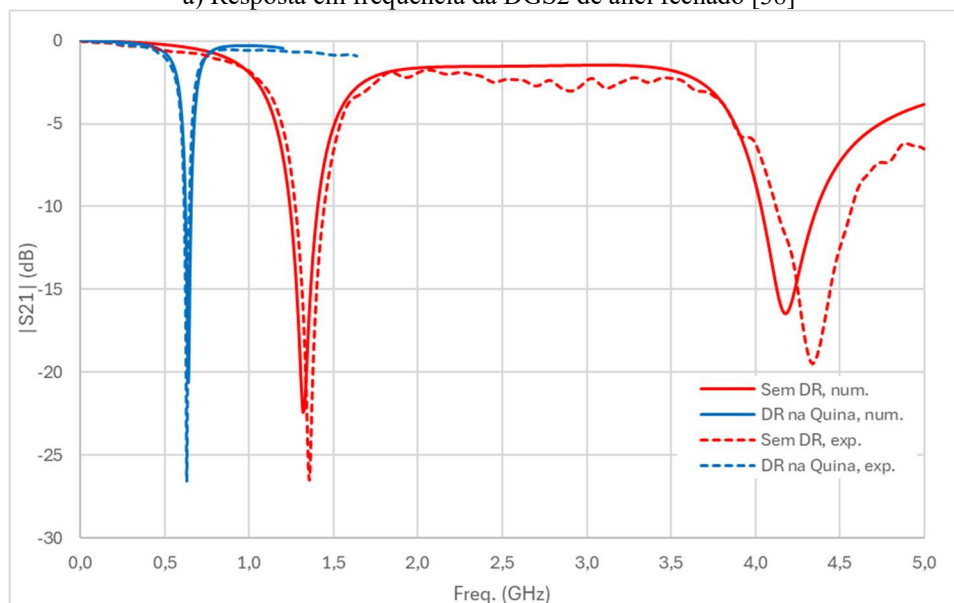
Observando a DGS2 de anel fechado, a frequência de ressonância apresentada na forma numérica foi de 0,80 GHz e 0,90 GHz na frequência de ressonância na forma experimental, já a DGS2 de anel aberto na forma numérica apresentou uma frequência de ressonância de 0,64 GHz e 0,63 GHz na forma experimental. Onde por sua vez a DGS2 de anel fechado apresentou uma redução de 68% em sua frequência de ressonância na forma numérica e 67% em sua frequência de ressonância na forma experimental quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR, ao observar o DGS2 de anel aberto, verificou-se que a frequência de ressonância na forma numérica sofreu uma

redução de 51,52% e a forma experimental reduziu 53,68% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR.

Para as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, a DGS2 de anel fechado apresentou uma largura de banda de 0,06 GHz na forma numérica e 0,05 GHz na forma experimental, com uma redução de 92% na largura de banda na forma numérica e uma redução de 94% na largura de banda na forma experimental. Enquanto a DGS2 de anel aberto apresentou uma largura de banda de 0,03 GHz na forma numérica e 0,03 GHz na forma experimental, com uma redução de 82,35% na forma numérica e 81,25% na forma experimental.



a) Resposta em frequência da DGS2 de anel fechado [38]



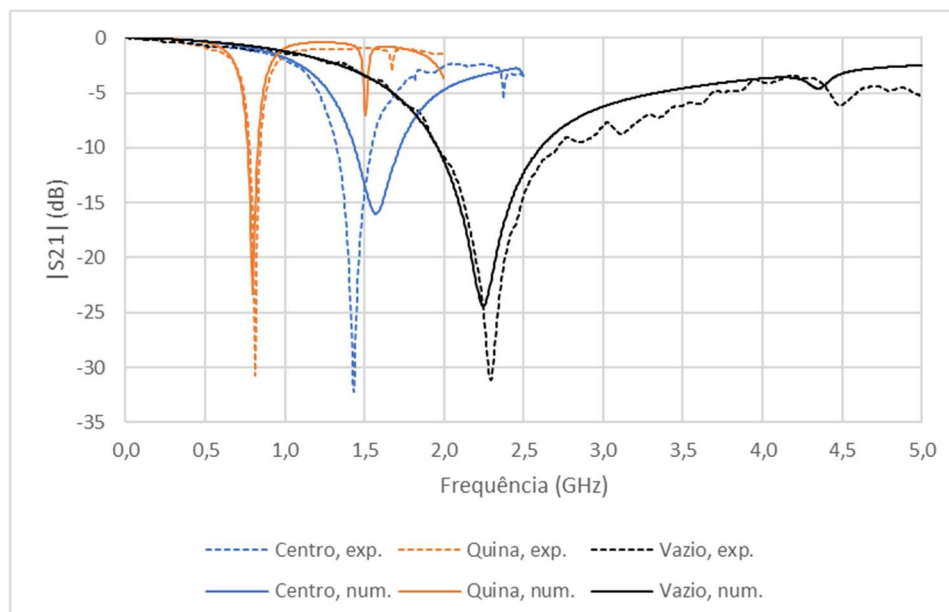
b) Resposta em frequência da DGS2 de anel aberto

Figura 56 –Resposta em frequência das DGSs2 de anel fechado e aberto com DR na quina.

Fonte: Autor.

Para a DGS3 de anel fechado, a frequência de ressonância apresentada na forma numérica foi de 0,80 GHz e 0,82 GHz na frequência de ressonância na forma experimental, já a DGS3 de anel aberto na forma numérica apresentou uma frequência de ressonância de 0,48 GHz e 0,68 GHz na forma experimental. Onde por sua vez a DGS3 de anel fechado apresentou uma redução de 64% em sua frequência de ressonância na forma numérica e 64% em sua frequência de ressonância na forma experimental quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR, observando o DGS3 de anel aberto, verificou-se que a frequência de ressonância na forma numérica sofreu uma redução de 58,97% e a forma experimental reduziu 43,33% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR.

Observando as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, a DGS3 de anel fechado apresentou uma largura de banda de 0,06 GHz na forma numérica e 0,06 GHz na forma experimental, com uma redução de 90% na largura de banda na forma numérica e uma redução de 91% na largura de banda na forma experimental. Enquanto a DGS3 de anel aberto apresentou uma largura de banda de 0,02 GHz na forma numérica e 0,04 GHz na forma experimental, com uma redução de 86,67% na forma numérica e 73,33% na forma experimental.



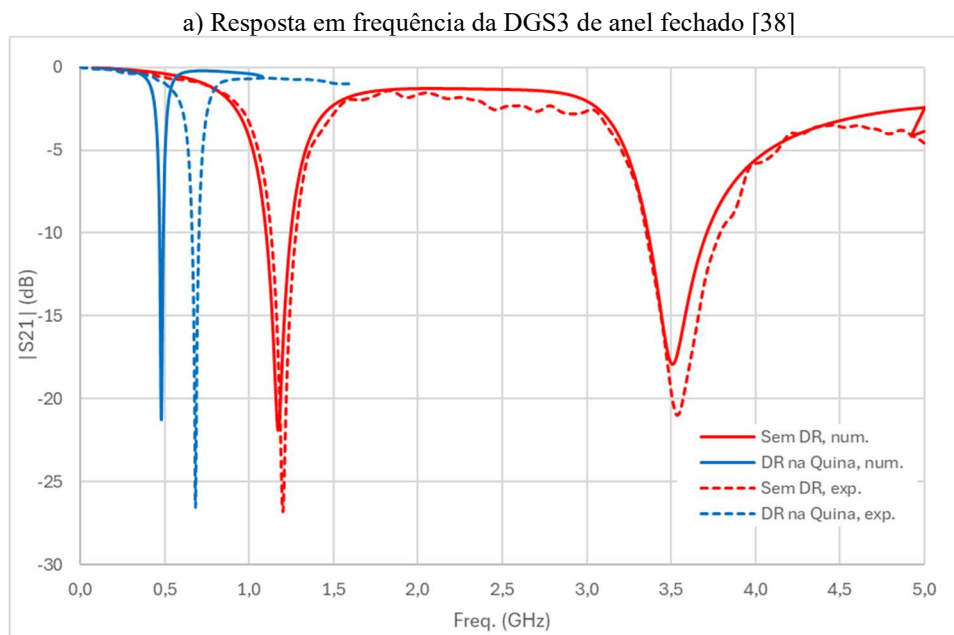
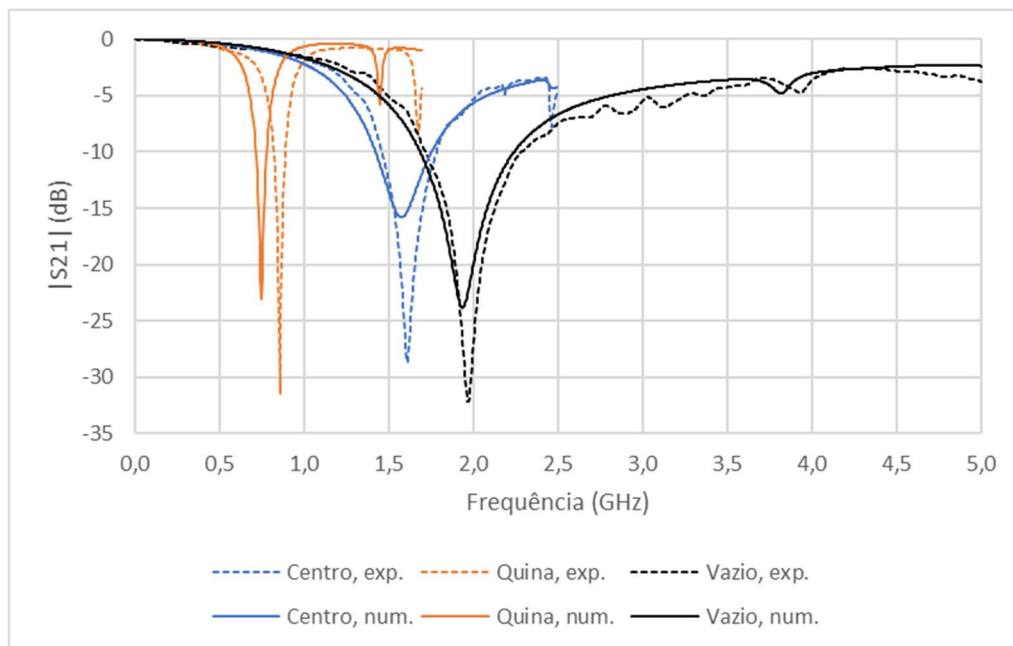


Figura 57 –Resposta em frequência das DGSs3 de anel fechado e aberto com DR na quina.

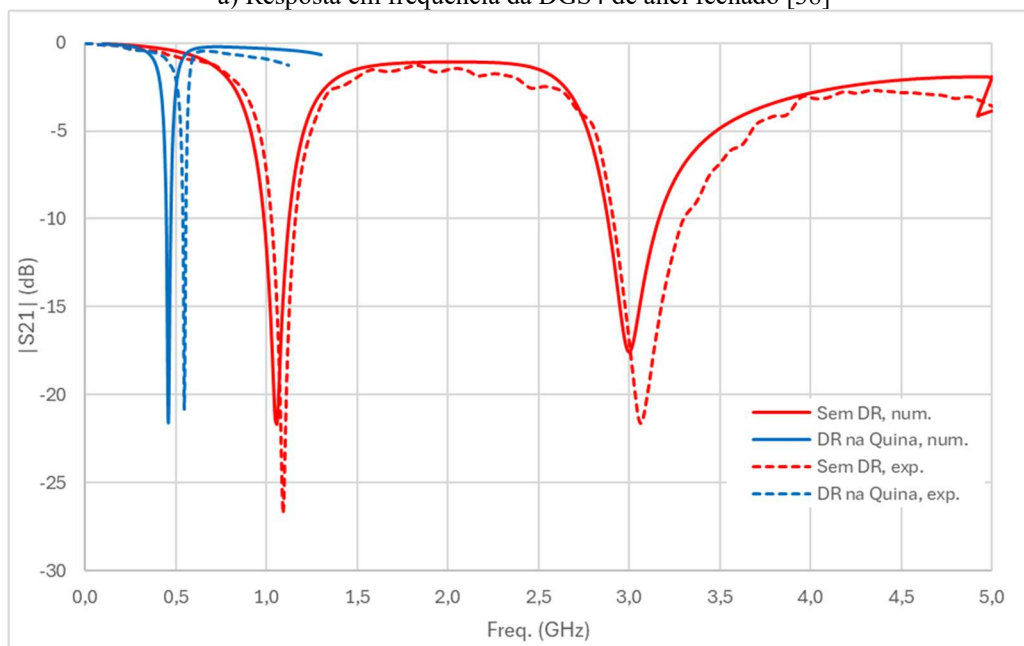
Fonte: Autor.

Para a DGS4 de anel fechado, a frequência de ressonância apresentada na forma numérica foi de 0,75 GHz e 0,86 GHz na frequência de ressonância na forma experimental, e a DGS4 de anel aberto na forma numérica apresentou uma frequência de ressonância de 0,46 GHz e 0,55 GHz na forma experimental. A partir disto observou-se que a DGS4 de anel fechado apresentou uma redução de 61% em sua frequência de ressonância na forma numérica e 56% em sua frequência de ressonância na forma experimental quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR, observando o DGS4 de anel aberto, verificou-se que a frequência de ressonância na forma numérica sofreu uma redução de 56,60% e a forma experimental reduziu 49,54% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR.

Além disso, as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, observadas na DGS4 de anel fechado apresentaram respectivamente uma largura de banda de 0,06 GHz na forma numérica e 0,07 GHz na forma experimental, com uma redução de 89% na largura de banda na forma numérica e uma redução de 88% na largura de banda na forma experimental. A DGS4 de anel aberto apresentou uma largura de banda de 0,03GHz na forma numérica e 0,02 GHz na forma experimental, com uma redução de 78,57% na forma numérica e 84,62% na forma experimental. Esses valores são resumidos nas Tabelas 12.



a) Resposta em frequência da DGS4 de anel fechado [38]



b) Resposta em frequência da DGS4 de anel aberto

Figura 58 –Resposta em frequência das DGSs4 de anel fechado e aberto com DR na quina.

Fonte: Autor.

Tabela 12 – Resultados para as DGSs de anel fechado e anel aberto, com DR na Quina

	$f_{res.num.}$ (GHz)	$f_{res.exp.}$ (GHz)	$\frac{dif. \%}{f_{res.}}$ $\left(\frac{num. DR}{num.}\right)$	$\frac{dif. \%}{f_{res.}}$ $\left(\frac{exp. DR}{exp.}\right)$	$BW_{num.}$ -10 dB (GHz)	$BW_{exp.}$ -10 dB (GHz)	$\frac{dif. \%}{BW}$ $\left(\frac{num. DR}{num.}\right)$	$\frac{dif. \%}{BW}$ $\left(\frac{exp. DR}{exp.}\right)$
DGS1 Anel Fechado	0,99 GHz	0,96 GHz	-74%	-73 %	0,06 GHz	0,05 GHz	-94 %	-98%
DGS1 Anel aberto	0,61 GHz	0,72 GHz	-62,35%	-53,55%	0,02 GHz	0,03 GHz	-88,89%	-83,33%
DGS2 Anel Fechado	0,86 GHz	0,90 GHz	-68%	-67%	0,06 GHz	0,05 GHz	-92%	-94%
DGS2 Anel aberto	0,64 GHz	0,63 GHz	-51,52%	-53,68%	0,03 GHz	0,03 GHz	-82,35%	-81,25%
DGS3 Anel Fechado	0,80 GHz	0,82 GHz	-64%	-64%	0,06 GHz	0,06 GHz	-90%	-91%
DGS3 Anel aberto	0,48 GHz	0,68 GHz	-58,97%	-43,33%	0,02 GHz	0,04 GHz	-86,67%	-73,33%
DGS4 Anel Fechado	0,75 GHz	0,86 GHz	-61%	-56%	0,06 GHz	0,07 GHz	-89%	-88%
DGS4 Anel aberto	0,46 GHz	0,55 GHz	-56,60%	-49,54%	0,03 GHz	0,02 GHz	-78,57%	-84,62%

A partir dos resultados apontados na Tabela 12, foi possível observar que as DGSs-matrioska de anel fechado com DR posicionado na quina da DGS apresentaram maior redução percentual da frequência de ressonância, quando comparadas às DGSs-matrioska anel aberto, porém essa diferença não é menor que no caso do DR posicionado no centro. Por outro lado, as reduções nas larguras de banda foram bem próximas para as DGSs-matrioska de anel aberto e DGSs-matrioska de anel fechado.

4.4. DGSs-matrioska com DR posicionado na fenda

Para a DGS1 de anel aberto com DR posicionado na fenda do DGS, frequência de ressonância de 0,62 GHz na forma numérica, e na forma experimental apresentou uma frequência de ressonância de 0,74 GHz, verificou-se que a frequência de ressonância na forma numérica sofreu uma redução de 61,73% e a forma experimental reduziu 52,26% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR. Observando as larguras de banda calculadas em -10 dB, a DGS1 de anel aberto apresentou uma largura de banda de 0,03GHz na forma numérica e 0,03 GHz na forma experimental, com uma

redução de 83,33% na forma numérica e 83,33% na forma experimental. Esses valores são resumidos nas Tabelas 13.

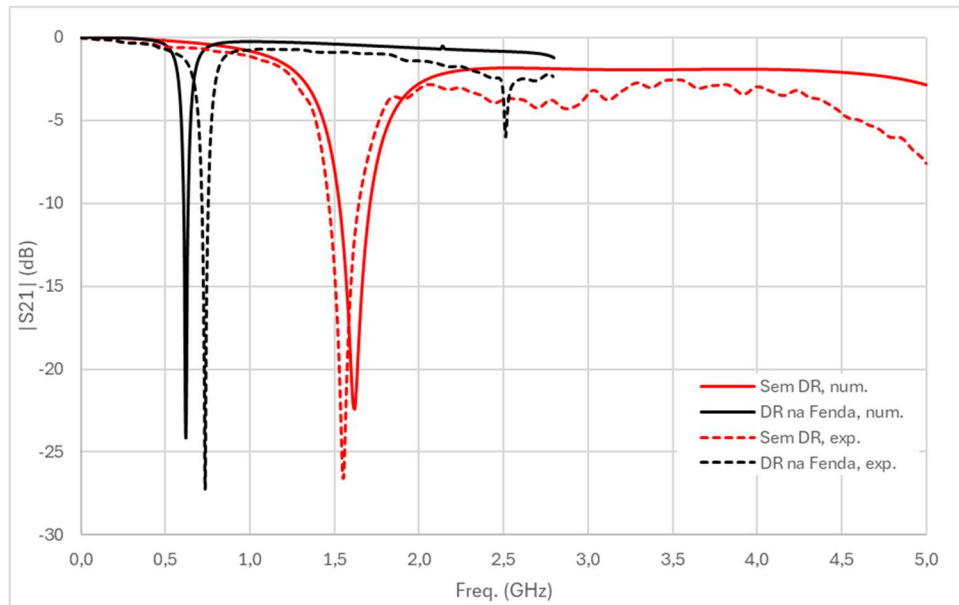


Figura 59 – Resposta em frequência DGS1 com DR na fenda com largura de banda de operação.

Fonte: Autor.

Observando agora DGS2 com DR posicionado na fenda do DGS, frequência de ressonância na forma numérica foi de 0,75GHz, e na forma experimental apresentou uma frequência de ressonância de 0,74 GHz, verificou-se que a frequência de ressonância na forma numérica sofreu uma redução de 43,18% e a forma experimental reduziu 45,59% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR. Observando as larguras de banda calculadas em -10 dB, a largura de banda na forma numérica foi de 0,05 GHz e 0,05 GHz na forma experimental, com uma redução de 70,59% na forma numérica e 68,75% na forma experimental. Esses valores são resumidos nas Tabelas 13.

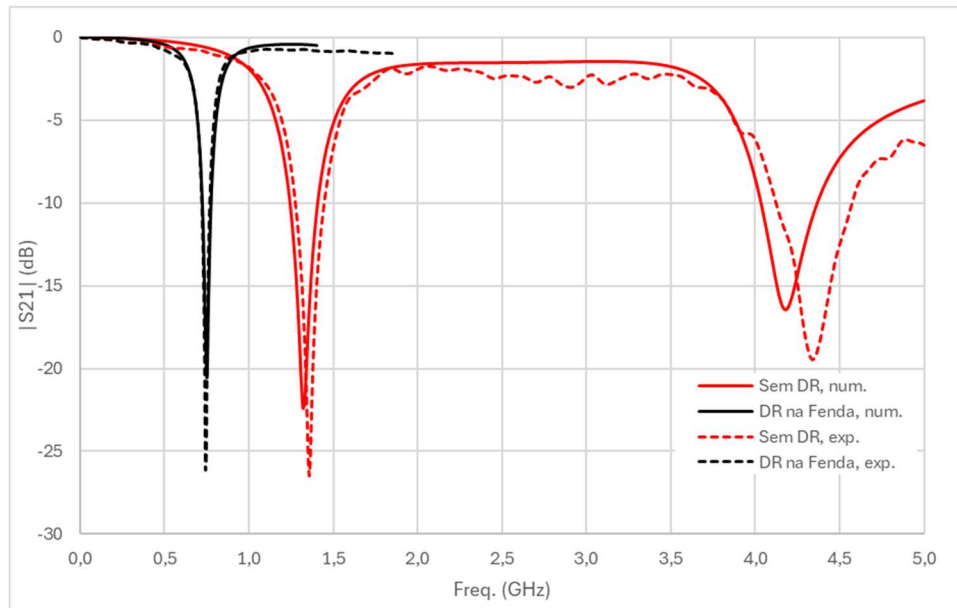


Figura 60 – Resposta em frequência DGS2 com DR na fenda com largura de banda de operação.

Fonte: Autor.

Para a DGS3 com DR posicionado na fenda do DGS, frequência de ressonância na forma numérica foi de 0,60GHz, e na forma experimental apresentou uma frequência de ressonância de 0,68 GHz, verificou-se que a frequência de ressonância na forma numérica sofreu uma redução de 48,72% e a forma experimental reduziu 43,33% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR. Observando as larguras de banda calculadas em -10 dB, a largura de banda na forma numérica foi de 0,05 GHz e 0,05 GHz na forma experimental, com uma redução de 66,67% na forma numérica e 66,67% na forma experimental. Esses valores são resumidos nas Tabelas 13.

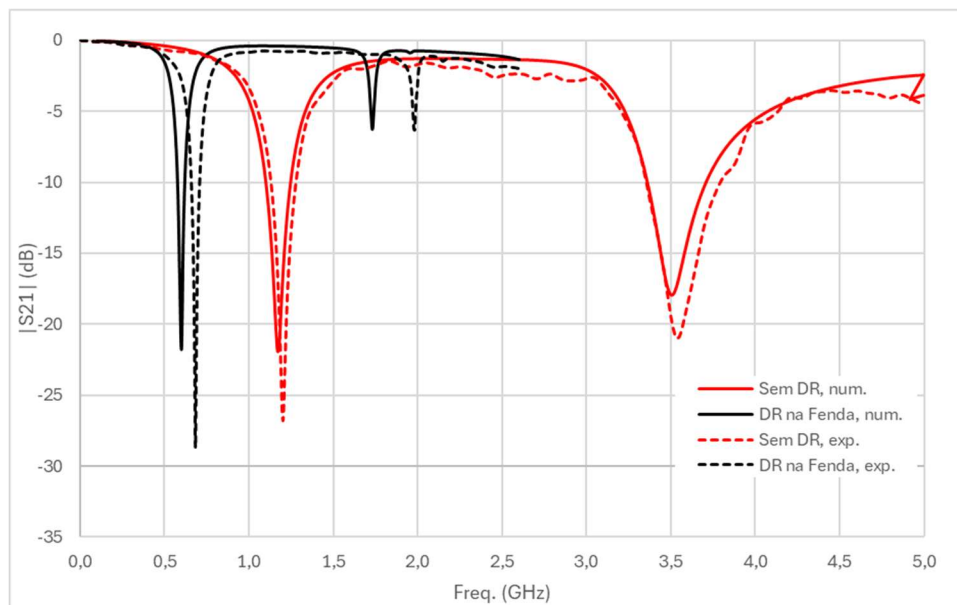


Figura 61 – Resposta em frequência DGS3 com DR na fenda com largura de banda de operação.

Fonte: Autor.

Por fim observando agora o DGS4 de anel aberto com DR posicionado na fenda, frequência de ressonância na forma numérica foi de 0,49 GHz, e na forma experimental apresentou uma frequência de ressonância de 0,57 GHz, verificou-se que a frequência de ressonância na forma numérica sofreu uma redução de 53,77% e a forma experimental reduziu 47,71% quando comparadas a frequência de ressonância sem a presença do DR. Observando as larguras de banda medidas e simuladas em -10 dB, a largura de banda na forma numérica foi de 0,04 GHz e 0,04 GHz na forma experimental, com uma redução de 71,43% na forma numérica e 69,23% na forma experimental. Esses valores são resumidos nas Tabelas 13.

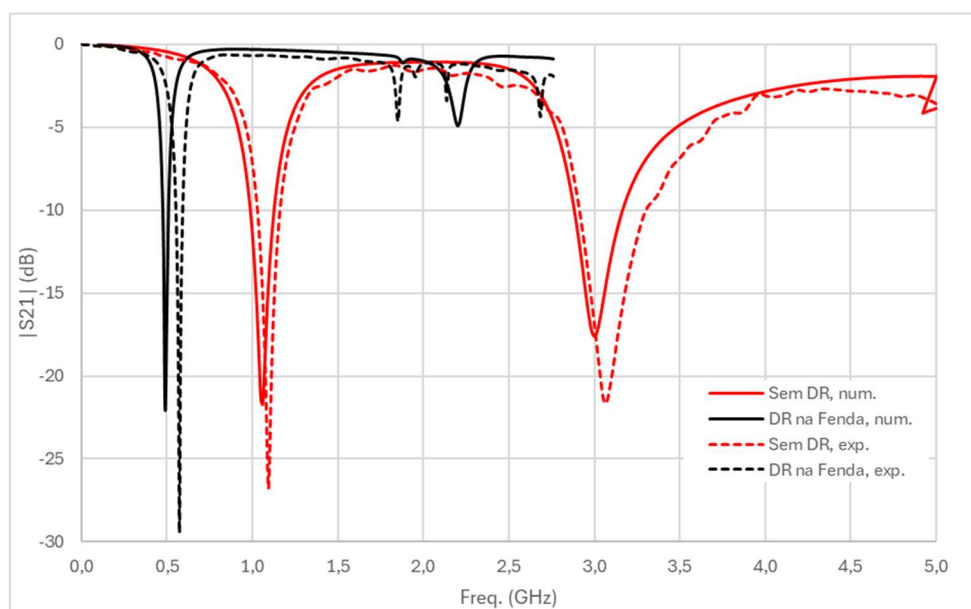


Figura 62 – Resposta em frequência DGS4 com DR na fenda com largura de banda de operação.

Fonte: Autor.

Tabela 13 – Resultados para as DGSs de anel aberto, com DR na Fenda

	$f_{res.num.}$ (GHz)	$f_{res.exp.}$ (GHz)	$\frac{dif. \% f_{res.}}{(\frac{num. DR}{num.})}$	$\frac{dif. \% f_{res.}}{(\frac{exp. DR}{exp.})}$	$BW_{num.}$ -10 dB (GHz)	$BW_{exp.}$ -10 dB (GHz)	$\frac{dif. \% BW}{(\frac{num. DR}{num.})}$	$\frac{dif. \% BW}{(\frac{exp. DR}{exp.})}$
DGS1 Anel aberto	0,62 GHz	0,74 GHz	-61,73%	-52,26%	0,03 GHz	0,03 GHz	-83,33%	-83,33%
DGS2 Anel aberto	0,75 GHz	0,74 GHz	-43,18%	-45,59%	0,05 GHz	0,05 GHz	-70,59%	-68,75%
DGS3 Anel aberto	0,60 GHz	0,68 GHz	-48,72%	-43,33%	0,05 GHz	0,05 GHz	-66,67%	-66,67%
DGS4 Anel aberto	0,49 GHz	0,57 GHz	-53,77%	-47,71%	0,04 GHz	0,04 GHz	-71,43%	-69,23%

Por fim, comparando os resultados obtidos para as DGSs-matrioska de anel aberto, com o DR posicionado na fenda, com os resultados obtidos para as DGSs-matrioska de anel aberto, com o DR posicionado na quina, observa-se que as variações da frequência de ressonância e da largura de banda são aproximadamente as mesmas, com uma redução ligeiramente maior para os casos do DR posicionado na quina.

5. CONCLUSÃO

5.1.Considerações finais

Nesta dissertação trabalho foram apresentados filtros rejeita-faixa compactos associando as DGSs-matrioska de anel aberto associado a um ressonador dielétrico (DR).

O desenvolvimento desta dissertação consistiu no estudo dos tipos de filtros, seus princípios básicos, classificações, características e aplicações. Onde por sua vez, os ressonadores planares tiveram ênfase nesta dissertação, pois os filtros projetados neste trabalho tiveram sua construção a partir de ressonadores de linhas de microfita.

As equações propostas neste trabalho foram feitas mediante a revisão de trabalhos anteriores associados à geometria matrioska. A caracterização numérica foi realizada utilizando o módulo HFSS, do programa Ansys Eletronics, no qual foram realizadas simulações, para obtenção dos resultados numéricos. A caracterização experimental foi realizada no Laboratório de Medidas em Telecomunicações – LMTel, do GTEMA-IFPB, utilizando um analisador de redes vetorial Agilent, modelo E5071C.

Com intuito de avaliar o comportamento da resposta em frequência dos filtros DGS-matrioska de anel aberto com e sem a presença do ressonador dielétrico de alta permissividade elétrica (DR), foram realizadas simulações numéricas em DGSs com diferentes dimensões, onde em seguida foi observado o comportamento da resposta em frequência dos DGSs com e sem a presença do DR. Da mesma forma também fabricados quatro filtros com diferentes dimensões, e analisados os comportamentos das respostas em frequências em função da adição do ressonador dielétrico em diferentes posições dos filtros DGS-matrioska de anel aberto, bem como o comportamento da resposta em frequência dos DGSs sem a presença do ressonador dielétrico.

As equações iniciais propostas para o trabalho apresentaram resultados satisfatórios quando comparados aos resultados numéricos e experimentais, no entanto as DGS3 e DGS4 apresentaram valores mais próximos aos resultados calculados. Além disso é interessante destacar que de acordo com os dados numéricos e experimentais deste trabalho, foi possível observar que quanto maior for as dimensões do DGS-matrioska de anel aberto, menor é sua frequência de ressonância e largura de banda, e isso também se aplica as DGSs-matrioska de anel fechado.

Outro ponto importante a ser destacado é a redução da frequência de ressonância e de suas larguras de banda de acordo com a posição do DR no filtro DGS-matrioska de anel aberto, onde observou-se que nas situações que o DR estava posicionado na quina e fenda das DGSs, as frequências de ressonâncias e larguras de banda apresentaram maior redução quando comparadas a situação sem a presença do DR, além disso, também foi possível observar uma redução largura de banda de operação.

Quanto à análise de densidade de corrente, observou-se que a presença do DR na quina da DGS apresentou uma assimetria da densidade de corrente, indicando a interação do DR com os campos eletromagnéticos.

Por fim ao observar os resultados apresentados pelos filtros DGSs-matrioska de anel aberto associados a ressonador dielétrico, e comparar com os resultados apresentados para os filtros DGSs-matrioska de anel fechado associados a ressonadores dielétricos, foi possível verificar uma maior redução nas frequências de ressonância e larguras de banda das DGSs-matrioska de anel fechado, no entanto as DGSs-matrioska de anel aberto apresentaram maior redução da largura de banda de operação. Dessa maneira apesar de ambas as DGSs apresentarem a possibilidade de ajuste de frequência, as DGSs-matrioska de anel aberto permitem uma maior flexibilidade quanto ao posicionamento do DR.

5.2.Sugestão e continuidade dos trabalhos

A partir deste ponto é importante destacar que os resultados apresentados nesta dissertação instigam a continuidade das pesquisas. Entre as sugestões de continuidade deste trabalho, podem ser citadas:

- O aumento da largura da fenda dos anéis;
- A utilização de mais de uma unidade DGS;
- O efeito da posição da fenda no anel aberto;
- A inserção de mais uma fenda nos anéis.

TRABALHO PUBLICADO

A. Gomes Neto, J. C. e Silva, J. Carvalho, A. G. DA. Junior, I. K. B. Medeiros, E. C. L. Donato, Filtro Rejeita-Faixa Compacto Associando DGS Matrioska de Anel Aberto e Ressonador Dielétrico, *in* 2024 *XXI Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica (SBMO)*, Bento Gonçalves, RS, Brasil, out. 2024, pp. 83-87.

REFERÊNCIAS

- [1] ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações, Espectro. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/espectro>. Acesso em 09/05/2024.
- [2] A. A. Ibrahim and S. M. Abbas, "Editorial for the special issue on the new trends in microwave/millimeter antennas/filters: from fundamental research to applications," *Micromachines (Basel)*, vol. 14, Oct. 2023, doi: 10.3390/mi14112019.
- [3] 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 18 de mai. de 2024.
- [4] Sachin Pathak, Shailesh Kumar Singh, "Microstrip Patch Antenna: A Review and the Current State of the Art," in 2021 *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 08, Issue: 06, June 2021, pp 1161-1170.
- [5] C. A. Balanis, "The Evolution of Antenna Technology: Reflectors and Microstrips," *In IEEE Antennas and Propagation Magazine*, doi: 10.1109/MAP.2024.3457317.
- [6] Anitha George, Anju Iqbal, Abdulla P, "A review of the Design and Development of Microstrip Multiband Bandpass Filter for 5G Systems," in 2024 *Journal of Applied Science, Engineering, Technology and Management*, Vol. 02, Issue: 02, may 2024, pp 03-08.
- [7] Hussain Bohra, Giriraj Prajapati, "Microstrip Filters: A Review of Different Filter Designs Used in Ultrawide Band Technology," in 2020 *Makara Journal of Technology*, Vol. 24, Issue: 2, Article 5, august 2020, pp 79-86, doi: 10.7454/mst.v24i2.3903.
- [8] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, I. B. G. Coutinho, S. S. C. Filho, D. A. Santos, B. L. C. Albuquerque, "A Defected Ground Structure Based on Matryoska Geometry," in 2022 *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 21, No. 2, June 2022
- [9] Danila Araújo Santos, **Filtros DGSs Baseados na Geometria Matrioska**, Dissertação de Mestrado, PPGEI, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2023.
- [10] **Matriosca**, disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Matriosca>, acesso em 29/09/2024.
- [11] M. Correia de Andrade, **Desenvolvimento de Filtros DGS-Matrioska Compactos Utilizando Ressonador Dielétrico**, Dissertação de Mestrado, PPGEI, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2024.
- [12] A. Gomes Neto, J. N. de Carvalho, D. F. Mamedes, M. C. De Andrade, J. A. Da Costa, "Compact Matryoshka DGS Using Dielectric Resonator," *In IEEE Access*, Vol. 12, pp. 21948-21953, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3363874
- [13] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, J. N. de Carvalho, D. F. Mamedes, M. C. de Andrade, J. A. da Costa, "Miniaturização de uma DGS Baseada na Geometria Matrioska Utilizando um Ressonador Dielétrico," 2024, *CBMAG*.
- [14] Jia-Shen G. Hong, Michael J. Lancaster, **Microstrip Filters for RF/microwave applications**, John Wiley & Sons, 2004.

- [15] M. Makimoto, S. Yamashita, **Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication**, ISBN 1437-0387, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
- [16] A. Flor Neto, **Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska com Anéis Retangulares e Circulares**, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2020.
- [17] Arthur B. Williams, Fred J. Taylor, **Electronic Filter Design Handbook**, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2006.
- [18] José André Costa, **Desenvolvimento de Filtros Passa-Faixa Planares Baseados na Geometria Matrioska com Três Camadas de Metalização**, Dissertação de Mestrado, PPGEE, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2024.
- [19] Sidnei Noceti Filho, **Filtros Seletores de Sinais**, 3 ed. Florianópolis,, Editora Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- [20] Charles A. Desoer, Ernest S. Kuh, **Teoria Básica de Circuitos**, Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, 1979.
- [21] David M. Pozar, **Microwave Engineering**, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2012.
- [22] Altium, **Suppress Noise and EMI in Your PCB With the Right Analog Filter Design**, disponível em: <https://resources.altium.com/p/suppress-noise-and-emi-your-pcb-right-analog-filter-design>, acesso em 30/09/2024.
- [23] Jitha B., **Development of Compact Microwave Filters Using Microstrip Loop Resonators**, PhD. Thesis, Cochin University of Science and Technology, Cochin, 2010.
- [24] Kai Chang, Lung-Hwa Hsieh, **Microwave Ring Circuits and Related Structures**, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [25] 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.
- [26] Alfredo Gomes Neto, Jefferson Costa e Silva, Joabson Nogueira de Carvalho, and Custódio Peixeiro. 2024. "Planar Printed Structures Based on Matryoshka Geometries: A Review" *Micromachines* 15, no. 4: 469. <https://doi.org/10.3390/mi15040469>
- [27] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, J. N.de Carvalho, J. do N. Cruz, H. de P. A. Ferreira, Analysis of the resonant behavior of FSS using Matryoshka geometry, in *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas, Brazil, Nov. 2015, pp. 1–5.
- [28] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, A. J. R. Serres, M. de O. Alencar1, I. B. G. Coutinho, T. da S. Evangelista, "Dual-band band-pass frequency selective surface based on the matryoshka geometry with angular stability and polarization independence," *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2020, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135542.
- [29] Alfrêdo Gomes Neto, Amaro Flor Neto, Mylenna Correia de Andrade, Jefferson Costa e Silva, Joabson Nogueira de Carvalho, "Filtros em microfita utilizando a geometria anéis matrioska circulares," in *MOMAG2018*, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil, 12–

15 de agosto, 2018, pp. 1. 366 - 370.

- [30] B. L. C. Albuquerque, G. K. S. Nobrega, M. S. Ferreira, A. F. D’Andrea, J. N. Carvalho, A. Gomes Neto, “A New Soil Moisture Sensor Based on Matryoshka DGS”. In: *2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2023, Castelldefels. 2023. p. 130-132.
- [31] D. F. Mamedes, A. Gomes Neto, J. Bornemann, J. C. Silva, F. A. T. Abreu, “A Sensor Using a Matryoshka Geometry Defected Ground Structure”. In: *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2022, Madrid, 2022.
- [32] APPCAD. Disponível em: <<http://www.hp.woodshot.com/>>. Acesso em 22/06/2024.
- [33] E. TEMEX. “Dielectric Resonators,” Disponível em: <<https://exxelia.com/uploads/PDF/e7000-v1.pdf>>. Acesso em: 22 de junho de 2024.
- [34] “Products for RF/Microwave Applications,” Disponível em: <<https://datasheet.octopart.com/SR9000SPQ0472AY-Trans-Tech-datasheet-8861441.pdf>>. Acesso em: 01 de outubro de 2024.
- [35] Ansys HFSS Disponível em: < <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> >. Acesso em: 28 de junho de 2024.
- [36] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, J. Carvalho, A. G. DA. Junior, I. K. B. Medeiros, E. C. L. Donato, Filtro Rejeita-Faixa Compacto Associando DGS Matryoshka de Anel Aberto e Ressonador Dielétrico, in *2024 XXI Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica (SBMO)*, Brazil, Oct. 2024, pp. 83-87.
- [37] Disponível em:<<https://www.keysight.com/br/pt/product/E5071C/e5071c-ena-vector-network-analyzer.html>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2025.
- [38] Myllena Correia de Andrade, **Desenvolvimento de Filtros DGS-matryoshka Compactos Utilizando Ressonador Dielétrico**, Dissertação de Mestrado, PPGEE, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2024.