

INSTITUTO FEDERAL
Paraíba

Campus
João Pessoa

INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Maria Thereza Gomes do Nascimento Roque

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE
UM FILTRO PASSA-BAIXA EM MICROFITA BASEADO EM STUBS E
ESTRUTURAS DGS DO TIPO MATRYOSHKA**

João Pessoa

2026

Maria Thereza Gomes Do Nascimento Roque

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS
GEOMÉTRICOS DE UM FILTRO PASSA-BAIXA EM
MICROFITA BASEADO EM STUBS E ESTRUTURAS DGS DO
TIPO MATRYOSKA**

**Trabalho de Conclusão de
Curso submetido à Coordenação
do Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal da Paraíba -
IFPB, como parte dos requisitos
para a obtenção do grau de
Engenheira Eletricista.**

Orientador: Prof. Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB

João Pessoa
2026

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

- R786a Roque, Maria Thereza Gomes do Nascimento.
Análise da influência dos parâmetros geométricos de um filtro passa-baixa em microfita baseado em stubs e estruturas DGS do tipo *matryoshka* / Maria Thereza Gomes do Nascimento Roque. – 2026.
68 f. : il.
TCC (Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Controle e Processos Industriais / Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2026.
Orientador: Prof^o Dr. Alfrêdo Gomes Neto.
1. Filtro passa-baixa. 2. Microfita. 3. DGS. 4. *Matryoshka*. 5. Análise paramétrica. I. Título.
- CDU 621.372.852.1(043)

MARIA THEREZA GOMES DO NASCIMENTO ROQUE

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE UM FILTRO PASSA-BAIXA EM MICROFITA BASEADO EM STUBS E ESTRUTURAS DGS DO TIPO MATRYOSHKA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC) submetido a Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), como parte dos requisitos institucionais para a obtenção do Título de **ENGENHEIRO ELETRICISTA**.

Aprovado em 18/06/2026 10:00

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. ALFRÉDO GOMES NETO

Instituto Federal da Paraíba
Orientador Interno

Profa. Dra. SUZETE ÉLIDA NÓBREGA CORREIA

Instituto Federal da Paraíba
Examinadora Interna

Prof. Dr. ADAILDO GOMES DASSUNÇÃO JÚNIOR

Instituto Federal da Paraíba
Examinador Interno

Documento assinado eletronicamente por:

- **Alfredo Gomes Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/06/2026 13:42:08.
- **Adaildo Gomes D Assuncao Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/06/2026 18:18:55.
- **Suzete Elida Nobrega Correia**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/06/2026 22:33:37.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/06/2026. 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 890939
Verificador: 7577a36b2f
Código de Autenticação:



Maria Thereza Gomes Do Nascimento Roque

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS
GEOMÉTRICOS DE UM FILTRO PASSA-BAIXA EM
MICROFITA BASEADO EM STUBS E ESTRUTURAS DGS DO
TIPO MATRYOSKA**

**Trabalho de Conclusão de
Curso submetido à Coordenação
do Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal da Paraíba -
IFPB, como parte dos requisitos
para a obtenção do grau de
Engenheira Eletricista.**

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Orientador**

**Prof. Suzete Elida Nóbrega Correia, Dra. - IFPB
Membro da Banca**

**Prof. Adaildo Gomes D'Assunção Júnior, Dr. - IFPB
Membro da Banca**

João Pessoa, Junho de 2026.

*A meu avô,
Manoel Romão do Nascimento,
meu mestre de vida,
meu primeiro professor
e, para além disso,
meu pai -
x2 -
com todo meu coração,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho, encerro também uma importante etapa da minha trajetória acadêmica. Sinto-me lisonjeada pelo apoio que recebi, direta e indiretamente, de todos aqueles que caminharam ao meu lado e compartilharam comigo o sonho desta formação. A vitória é real!

Me parece sensato iniciar os agradecimentos por quem tanto fez por mim, a vida toda e para além dela: o meu avô, meu fiel amigo, meu pai ao quadrado e o meu exemplo de vida, Manoel Romão do Nascimento, homem da paz. Sou privilegiada em ter partilhado de tamanha existência, doce, serena e forte. Hoje, a saudade transmuta em felicidade, pois o nosso sonho é completamente realidade, vô. Agradeço infinitamente, desde e para sempre, pela herança valiosa que me presenteou: a educação.

À minha avó, Elisabete Gomes do Nascimento, a minha sincera admiração. Você é afago em minha vida. Inspiração. Perseverança. Você ilumina a minha jornada, vô. Eu me sinto honrada pela sua criação para comigo e me orgulho imensamente dessa minha riqueza. Eu te amo!

A minha mãe, Nádia Assunção Gomes do Nascimento, minha fiel escudeira e mulher extraordinária, a minha genuína gratidão. Sonhou comigo. Lutamos. Superamos dificuldades. Fomos resilientes e agora desfrutamos dessa realização juntas, é conquista nossa. A sua determinação me impulsiona. Que benção é ter você em minha vida, mãe!

Ao meu noivo, o meu parceiro de vida e o meu amor, Alberto Andres Andres Polo, a minha feliz gratidão. Pelo companheirismo sincero, apoio imensurável e em especial, por cultivar em mim, a confiança de que eu sempre posso ir além. És precioso para mim. Eu sou verdadeiramente feliz por te ter em minha vida. *Te quiero*.

A minha pequena prima, Aurora Maria, a alegria, doçura e carinho que sempre traz aos meus estudos é digno de reverência. Eu te amo mais que o tamanho do mundo.

A minha tia, Maria Auxiliadora, agradeço por fazer tão bem o seu papel de madrinha para comigo. É especialíssimo ser sua sobrinha e afilhada, tia.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto, agradeço pelos ensinamentos, pela confiança, pela disponibilidade e pela orientação dedicada ao longo desta pesquisa. É uma honra ter sido sua orientanda.

A professora Dra. Suzete Élida, que literalmente pula junto de alegria com as minhas

conquistas, saiba que és uma inspiração de profissionalismo, dedicação e entusiasmo pela docência. Agradeço.

Ao professor Dr. Adaildo Junior, quem primeiro me apresentou o ANSYS, agradeço pela sua presença em minha banca.

Ao professor Dr. Gilvan Vieira, agradeço pela dedicação e pelo excelente trabalho desempenhado na coordenação do curso de Engenharia Elétrica.

Aos professores do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, pelos conhecimentos transmitidos e pela dedicação à formação de seus alunos, agradeço. Cada disciplina, orientação e conselho contribuíram para a profissional que me formei hoje.

Ao Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA), pela oportunidade de aprendizado, pelas discussões técnicas e pelo ambiente de pesquisa que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos verdadeiros que compartilharam comigo os desafios, as conquistas e os aprendizados ao longo da graduação, agradeço pelas conversas, pela partilha enriquecedora de conhecimento e pelos momentos que tornaram essa caminhada mais leve.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB) e todo o corpo de funcionários que operam para que a instituição proporcione uma formação de excelência e inúmeras oportunidades de crescimento acadêmico, profissional e pessoal, como foi para mim.

Concluir este Trabalho de Conclusão de Curso representa a concretização de anos de dedicação, aprendizado e superação. Mais do que o encerramento desta etapa acadêmica, este ato representa a conexão para a próxima. A todos que verdadeiramente fizeram parte desta trajetória, o meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

Os filtros passa-baixas desempenham papel fundamental em sistemas de telecomunicações, sendo responsáveis pela seleção de frequências desejadas e pela atenuação de sinais indesejados. Entre as diversas técnicas empregadas para aprimorar o desempenho desses dispositivos, destacam-se as estruturas de terra defeituosas (*Defected Ground Structures – DGS*), que possibilitam melhorias na seletividade, na largura da banda de rejeição e na miniaturização dos circuitos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar a influência dos parâmetros geométricos de um filtro passa-baixa compacto, em tecnologia microfita, composto por *stubs* e estruturas DGS do tipo Matryoshka, sobre sua resposta em frequência. Inicialmente, foi reproduzida e validada, por meio do software ANSYS HFSS, uma geometria proposta na literatura. Em seguida, foram realizados estudos paramétricos envolvendo o comprimento do *stub*, as dimensões dos anéis ressonantes da estrutura Matryoshka, a utilização simultânea de duas células DGS e o espaçamento entre essas células. Os resultados demonstraram que o comprimento do *stub* influencia diretamente o posicionamento das bandas de rejeição, enquanto as dimensões das células Matryoshka atuam predominantemente no deslocamento das frequências ressonantes para valores mais baixos. Observou-se ainda que a utilização de duas células Matryoshka promoveu um aumento expressivo da profundidade das bandas rejeitadas, atingindo aproximadamente $-58,65$ dB, além de introduzir múltiplos modos ressonantes na resposta do filtro. Em relação ao espaçamento entre as células, verificou-se que esse parâmetro exerce influência principalmente sobre a intensidade da rejeição, estando associado ao grau de acoplamento eletromagnético entre os ressonadores. Os resultados obtidos permitiram identificar os parâmetros geométricos mais relevantes para o desempenho da estrutura e demonstraram o potencial das geometrias Matryoshka aplicadas a estruturas DGS para o desenvolvimento de filtros passa-baixas compactos, seletivos e com ampla banda de rejeição.

Palavras-chave: filtro passa-baixa; microfita; DGS; Matryoshka; análise paramétrica; telecomunicações.

ABSTRACT

Low-pass filters play a fundamental role in telecommunications systems, being responsible for selecting desired frequencies and attenuating unwanted signals. Among the techniques employed to improve the performance of these devices, Defected Ground Structures (DGS) stand out for their ability to enhance selectivity, widen the stopband, and contribute to circuit miniaturization. In this context, this work aimed to analyze the influence of the geometric parameters of a compact microstrip low-pass filter based on stubs and Matryoshka-type DGS structures on its frequency response. Initially, a reference geometry reported in the literature was reproduced and validated using the ANSYS HFSS electromagnetic simulation software. Subsequently, parametric studies were carried out considering the stub length, the dimensions of the Matryoshka resonant rings, the simultaneous use of two DGS cells, and the spacing between these cells. The results showed that the stub length directly affects the position of the stopbands, while the dimensions of the Matryoshka cells mainly shift the resonant frequencies toward lower values. Furthermore, the use of two Matryoshka cells significantly increased the rejection level, reaching approximately -58.65 dB, and introduced multiple resonant modes into the filter response. Regarding the spacing between cells, it was observed that this parameter mainly affects the rejection level due to variations in the electromagnetic coupling between resonators. The obtained results allowed the identification of the most relevant geometric parameters for the filter performance and demonstrated the potential of Matryoshka-based DGS structures for the development of compact, highly selective low-pass filters with wide stopbands.

Keywords: low-pass filter; microstrip; DGS; Matryoshka; parametric analysis; telecommunications.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução dos sistemas de telecomunicações.	15
Figura 2 - Bonecas Russas Matryoshkas.	17
Figura 3 - Geometria DGS-Matryoshka utilizada no projeto do filtro.	17
Figura 4 - Resposta em frequência de um filtro passa-baixa (LPF).	22
Figura 5 – Representação simplificada de uma rede de duas portas utilizada na definição dos parâmetros S.	24
Figura 6 - Estrutura geral de uma linha de microfita.	25
Figura 7 - Identificação dos stubs presentes na estrutura analisada.	27
Figura 8 - Diferentes formas da estrutura DGS.	29
Figura 9 – Evolução da geometria Matryoshka (anéis → SRR → Matryoshka).	30
Figura 10 – Geometria do filtro passa-baixa reproduzido no ANSYS HFSS.	33
Figura 11 - Geometria do filtro passa-baixa utilizada como base para reprodução computacional.	34
Figura 12 - Geometria do filtro reproduzido no ANSYS HFSS com identificação dos principais elementos da estrutura.	36
Figura 13 - Configuração da simulação eletromagnética destacando a caixa de radiação utilizada nas análises.	37
Figura 14 - Evolução geométrica das etapas de modelagem desenvolvidas para reprodução do filtro estudado.	38
Figura 15 - Fluxograma do procedimento de análise paramétrica adotado neste trabalho.	41
Figura 16 - Identificação do parâmetro LST2 utilizado na análise da influência do comprimento do stub sobre a resposta em frequência do filtro.	42
Figura 17 - Parâmetros geométricos considerados na análise da célula Matryoshka individual.	42
Figura 18 - Parâmetros geométricos considerados na análise da configuração com duas células Matryoshka.	43
Figura 19 - Identificação do parâmetro DEL12Y correspondente ao espaçamento entre as células DGS do tipo Matryoshka.	43
Figura 20 - Principais parâmetros eletromagnéticos utilizados na interpretação das curvas	

de transmissão (S21), incluindo frequências de rejeição, bandas rejeitadas e profundidade de rejeição.	45
Figura 21 - Influência do comprimento do stub na resposta em frequência do filtro.	47
Figura 22 - Frequência de ressonância em função do comprimento do stub (LST2).	48
Figura 23 - Influência das dimensões da célula Matryoshka na resposta em frequência do filtro.	51
Figura 24 - Influência das dimensões das células Matryoshka (WMA11X e WMA21X) na resposta em frequência do filtro.	53
Figura 25 - Resposta em frequência do filtro para diferentes valores do espaçamento entre as células Matryoshka (DEL12Y).	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros geométricos utilizados na modelagem da estrutura proposta.	34
Tabela 2 - Objetivos da análise de cada configuração estudada.	38
Tabela 3 - Parâmetros geométricos avaliados durante as simulações.	44
Tabela 4 - Parâmetros eletromagnéticos avaliados nas simulações.	46
Tabela 5 - Frequência de ressonância em função do comprimento do stub.	48
Tabela 6 - Configurações analisadas para a estrutura Matryoshka.	50
Tabela 7 - Frequências de rejeição obtidas para cada configuração.	51
Tabela 8 - Frequências e níveis de rejeição obtidos para diferentes dimensões das células Matryoshka.	54
Tabela 9 - Frequências de rejeição e níveis de atenuação obtidos para diferentes valores de DEL12Y.	57

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

DGS	-	<i>Defected Ground Structure</i>
LMTel	-	Laboratório de Medidas em Telecomunicações
IFPB	-	Instituto Federal da Paraíba
5G	-	Quinta Geração de Redes Móveis
HFSS	-	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
RF	-	Rádiofrequência
LPF	-	<i>Low Pass Filter</i>
LC	-	Indutor-Capacitor
GTEMA	-	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IoT	-	Internet das Coisas
FSS	-	<i>Frequency Selective Surface</i>
SRRs	-	<i>Split Ring Resonators</i>
FEM	-	<i>Finite Element Method</i>
dB	-	Decibel

LISTA DE SÍMBOLOS

LST2	-	Comprimento do stub central
WMA1A	-	Largura do anel externo da célula Matryoshka unitária
WMA2A	-	Largura do anel interno da célula Matryoshka unitária
WMA11X	-	Largura do anel externo da célula Matryoshka 1
WMA21X	-	Largura do anel externo da célula Matryoshka 2
DEL12Y	-	Espaçamento entre as células Matryoshka
F_c	-	Frequência de corte
F_s	-	Frequência superior da banda de transição
S11	-	Coefficiente de reflexão
S21	-	Coefficiente de transmissão
WmaA	-	Largura da célula Matryoshka A
WmaB	-	Largura da célula Matryoshka B
dAB	-	Distância entre as células Matryoshka A e B
Lst1	-	Comprimento do stub 1
Lst2	-	Comprimento do stub 2
Lst3	-	Comprimento do stub 3
dst1-st2	-	Espaçamento entre os stubs 1 e 2
dst2-st3	-	Espaçamento entre os stubs 2 e 3
Wst	-	Largura dos stubs
A	-	Primeira célula DGS do tipo Matryoshka
B	-	Segunda célula DGS do tipo Matryoshka

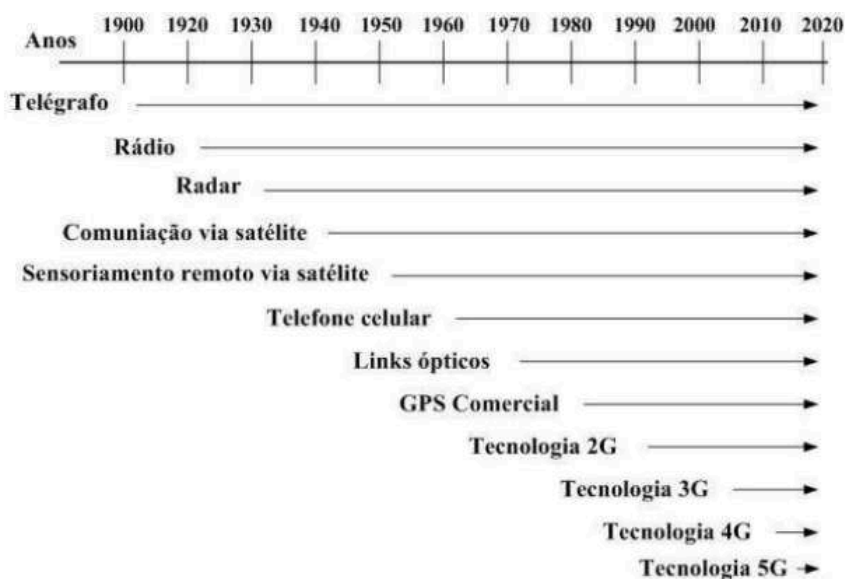
SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	19
1.2 Organização do trabalho	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Filtros em Micro-ondas	21
2.2 Filtros Passa-Baixa	22
2.3 Parâmetros S	23
2.4 Tecnologia Microfita	25
2.5 Stubs em Filtros Planares	26
2.6 Estruturas DGS	28
2.7 Geometria Matryoshka	29
2.8 Influência dos Parâmetros Geométricos	31
3 METODOLOGIA	33
3.1 Estrutura de Referência	33
3.2 Ambiente de Simulação	35
3.3 Reprodução do Filtro	37
3.4 Procedimento de Análise Paramétrica	39
3.5 Parâmetros Geométricos Avaliados	41
3.6 Parâmetros Eletromagnéticos Analisados	44
4 RESULTADOS	47
4.1 Influência do Comprimento do Stub	47
4.2 Análise Paramétrica da Estrutura Matryoshka	50
4.3 Influência da Utilização de Duas Células DGS	53
4.4 Influência do Espaçamento entre as células DGS	56
4.5 Discussão Consolidada dos Resultados	59
5 CONCLUSÃO	62
	13

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os sistemas de telecomunicações passaram por uma evolução acelerada, impulsionada pelo avanço das tecnologias de comunicação e pelo crescimento contínuo da demanda por conectividade. Aplicações como redes móveis de quinta geração (5G), Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, inteligência artificial, telemedicina e cidades inteligentes dependem diretamente de infraestruturas de telecomunicações cada vez mais eficientes, confiáveis e capazes de transportar grandes volumes de dados em altas velocidades (HONG; LANCASTER, 2004; COSTA, 2024). Nesse contexto, o espectro de radiofrequências tornou-se um recurso cada vez mais disputado, exigindo soluções que permitam o uso eficiente das diferentes faixas de frequência disponíveis, exemplificado pela Figura 1.

Figura 1 - Evolução dos sistemas de telecomunicações.



Fonte: Costa (2024).

Entre os diversos dispositivos empregados nos sistemas de telecomunicações, os filtros desempenham papel fundamental. Sua principal função consiste em selecionar ou rejeitar determinadas faixas de frequência, permitindo a transmissão dos sinais desejados e atenuando sinais indesejados que possam comprometer o desempenho do sistema (HONG; LANCASTER, 2004). Dessa forma, os filtros são amplamente utilizados em sistemas de comunicação sem fio, radares, enlaces por satélite, equipamentos de medição, dispositivos móveis e diversas outras aplicações em radiofrequência (RF) e micro-ondas.

Com a crescente complexidade dos sistemas modernos, os requisitos de desempenho impostos aos filtros tornaram-se cada vez mais rigorosos. Além de apresentarem baixas perdas de inserção e elevada seletividade, esses dispositivos devem possuir dimensões reduzidas, baixo custo de fabricação, facilidade de integração com circuitos eletrônicos e capacidade de operar adequadamente em ambientes de elevada densidade espectral. Nesse contexto, destaca-se a importância dos filtros passa-baixas, amplamente empregados em sistemas de radiofrequência e micro-ondas para suprimir componentes indesejados localizados acima da frequência de operação desejada.

Os filtros passa-baixas permitem a transmissão de sinais cujas frequências estejam abaixo de uma determinada frequência de corte (F_c), enquanto atenuam os sinais localizados acima desse limite. Para muitas aplicações, entretanto, não basta apenas estabelecer uma frequência de corte adequada. É desejável que esses dispositivos apresentem uma transição rápida entre a banda passante e a banda de rejeição, característica conhecida como *roll-off* acentuado, além de uma ampla faixa de rejeição capaz de minimizar interferências provenientes de harmônicos e respostas espúrias em frequências mais elevadas (HONG; LANCASTER, 2004; OUF; EL-HAMEED; ABDALLAH, 2024).

Diversas técnicas têm sido propostas para melhorar o desempenho de filtros planares em microfita. Dentre elas, destacam-se as Estruturas de Terra Defeituosas, conhecidas como *Defected Ground Structures* (DGS). Essa técnica consiste na introdução de discontinuidades ou geometrias específicas no plano de terra da linha de transmissão, alterando a distribuição dos campos eletromagnéticos e produzindo características desejáveis na resposta em frequência do dispositivo. Como resultado, é possível obter filtros mais compactos, com melhor seletividade e maior capacidade de rejeição de frequências indesejadas quando comparados a configurações convencionais (HONG; LANCASTER, 2004).

Figura 2 - Bonecas Russas Matryoshkas.



Fonte: Costa (2024).

Nesse cenário, o Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA), do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), vem desenvolvendo pesquisas relacionadas à utilização da geometria Matryoshka em dispositivos de radiofrequência e micro-ondas. Inspirada nas tradicionais bonecas russas de mesmo nome, Figura 2, a geometria Matryoshka é formada por anéis concêntricos interligados que permitem aumentar significativamente o comprimento elétrico da estrutura sem elevar proporcionalmente suas dimensões físicas. Essa característica, representada pela Figura 3, proporciona vantagens importantes relacionadas à miniaturização e ao controle das propriedades de ressonância dos dispositivos (MARIANO, 2017).

Figura 3 - Geometria DGS-Matryoshka utilizada no projeto do filtro.



Fonte: Adaptado de (MARIANO, 2017).

Inicialmente aplicada em superfícies seletivas em frequência (*Frequency Selective Surfaces* – FSS), a geometria Matryoshka passou posteriormente a ser utilizada em diferentes configurações de filtros planares, apresentando resultados promissores em termos de seletividade, redução de dimensões e controle da resposta em frequência (MARIANO, 2017). Mais recentemente, pesquisas desenvolvidas pelo GTEMA ampliaram a aplicação dessa geometria para novas configurações de filtros passa-faixa e filtros passa-baixas, explorando sua utilização em conjunto com estruturas DGS e outras técnicas de projeto (COSTA, 2024).

Em continuidade a essa linha de pesquisa, estudos recentes têm investigado filtros passa-baixas compactos baseados na geometria Matryoshka aplicada ao plano de terra. Os resultados apresentados por Carvalho et al. (2025) demonstram que essa abordagem possibilita a obtenção de filtros com elevada seletividade, ampla banda de rejeição e dimensões reduzidas, características desejáveis para aplicações em sistemas modernos de telecomunicações.

Embora os resultados apresentados na literatura demonstrem o potencial das estruturas DGS do tipo Matryoshka para aplicações em filtros planares, a compreensão detalhada da influência dos parâmetros geométricos sobre a resposta em frequência ainda constitui uma etapa fundamental para o processo de projeto e otimização desses dispositivos. Nesse contexto, análises paramétricas permitem identificar a contribuição individual de cada elemento da estrutura, fornecendo informações relevantes para o desenvolvimento de filtros com características adequadas a diferentes aplicações em telecomunicações.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar numericamente a influência dos parâmetros geométricos de um filtro passa-baixa compacto em tecnologia microfita, composto por stubs e estruturas DGS do tipo Matryoshka, sobre sua resposta em frequência. Para isso, são realizadas simulações eletromagnéticas no software ANSYS Electronics Desktop 2024 R1, por meio do módulo *High Frequency Structure Simulator* (HFSS), investigando-se os efeitos das dimensões dos ressonadores, do comprimento dos stubs e do espaçamento entre as estruturas DGS no comportamento espectral do dispositivo. Busca-se identificar a influência dos principais parâmetros geométricos sobre as frequências de rejeição, a profundidade das bandas rejeitadas e o acoplamento eletromagnético entre os ressonadores, contribuindo para a compreensão do comportamento da estrutura e para futuras etapas de otimização do filtro.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a influência dos parâmetros geométricos de um filtro passa-baixa em tecnologia microfita, composto por stubs e estruturas DGS do tipo Matryoshka, sobre sua resposta em frequência, por meio de simulações eletromagnéticas realizadas no software ANSYS HFSS.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre filtros passa-baixas, tecnologia microfita, stubs e estruturas *Defected Ground Structure* (DGS) do tipo Matryoshka;
- Reproduzir e validar, em ambiente de simulação, a geometria do filtro proposta no trabalho de referência por meio da análise dos parâmetros de espalhamento;
- Investigar a influência do comprimento do *stub* sobre o posicionamento das frequências de rejeição do filtro;
- Avaliar o efeito das dimensões da estrutura Matryoshka sobre a resposta em frequência e sobre as bandas rejeitadas do dispositivo;
- Analisar a influência da utilização simultânea de duas células Matryoshka no comportamento espectral e nos níveis de rejeição obtidos;
- Investigar o efeito do espaçamento entre as células DGS sobre o acoplamento eletromagnético e a profundidade das bandas rejeitadas;
- Identificar os parâmetros geométricos mais relevantes para a sintonia das frequências de rejeição e para o desempenho geral da estrutura analisada;
- Consolidar e discutir os resultados obtidos, evidenciando a contribuição dos diferentes parâmetros geométricos para o comportamento eletromagnético do filtro.

1.2 Organização do trabalho

Para atender aos objetivos propostos, este trabalho foi estruturado em cinco capítulos.

O Capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos que servem de base para o desenvolvimento da pesquisa, abordando conceitos relacionados a filtros passa-baixas, linhas de microfita, parâmetros de espalhamento, estruturas *Defected Ground Structure* (DGS) e geometria Matryoshka.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia adotada, contemplando a modelagem da estrutura analisada, a parametrização dos elementos geométricos e os procedimentos empregados nas simulações eletromagnéticas realizadas no software ANSYS HFSS.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nas análises paramétricas realizadas, bem como as discussões acerca da influência dos diferentes parâmetros geométricos sobre a resposta em frequência do filtro.

Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do trabalho, destacando os principais resultados alcançados, as contribuições da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Filtros em Micro-ondas

Os sistemas de telecomunicações modernos dependem da transmissão e do processamento eficiente de sinais em radiofrequência (RF) e micro-ondas, sendo amplamente empregados em aplicações como comunicações móveis, redes sem fio, sistemas de radar, enlaces via satélite e dispositivos de sensoriamento remoto. Nesse contexto, os filtros constituem componentes fundamentais para o adequado condicionamento espectral dos sinais, garantindo o funcionamento eficiente e confiável dos sistemas de comunicação.

De maneira geral, os filtros são dispositivos capazes de selecionar determinadas componentes de frequência de um sinal, permitindo a passagem das frequências desejadas e atenuando componentes indesejadas. Essa característica torna os filtros essenciais para a redução de interferências, supressão de ruídos, eliminação de harmônicos e adequação espectral dos sinais transmitidos e recebidos.

Em sistemas de RF e micro-ondas, os filtros desempenham papel fundamental em diferentes estágios das cadeias de transmissão e recepção. Em transmissores, são utilizados para limitar emissões fora da faixa de operação desejada, enquanto em receptores auxiliam na rejeição de sinais interferentes e no aumento da seletividade do sistema. Dessa forma, contribuem diretamente para a melhoria da qualidade do sinal e para a eficiência dos sistemas de telecomunicações.

Os filtros podem ser classificados de acordo com sua resposta em frequência, sendo os principais tipos os filtros passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa. Cada uma dessas categorias apresenta características específicas de transmissão e rejeição espectral, sendo selecionada conforme os requisitos da aplicação. Dentre essas categorias, os filtros passa-baixa destacam-se pela capacidade de transmitir sinais abaixo de uma determinada frequência limite e atenuar componentes localizados em frequências superiores, característica que os torna amplamente utilizados em sistemas de RF e micro-ondas (HONG; LANCASTER, 2004; POZAR, 2012).

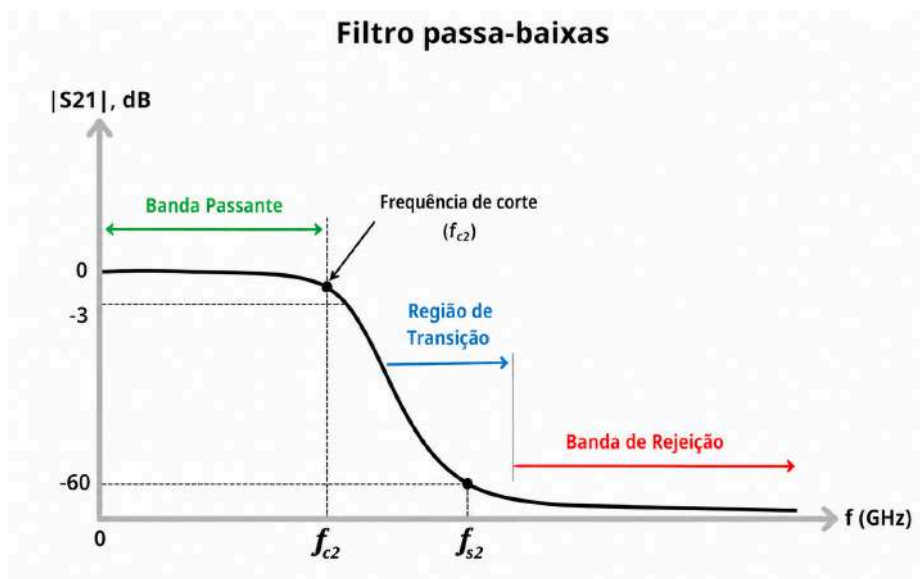
2.2 Filtros Passa-Baixa

Os filtros passa-baixa, conhecidos na literatura como *Low-Pass Filters* (LPFs), constituem uma das categorias mais importantes de filtros utilizados em sistemas de radiofrequência e micro-ondas, sendo amplamente empregados em aplicações que demandam controle espectral e supressão de componentes indesejadas (HONG; LANCASTER, 2001). Esses dispositivos são projetados para permitir a transmissão de sinais localizados abaixo de uma determinada frequência limite, denominada frequência de corte, enquanto atenuam progressivamente os componentes espectrais situados em frequências superiores.

A frequência de corte representa o limite entre a região de transmissão e a região de atenuação do filtro, sendo convencionalmente definida no ponto correspondente a uma redução de 3 dB na potência transmitida em relação à banda passante (POZAR, 2012). Dessa forma, o comportamento de um filtro passa-baixa pode ser dividido em duas regiões principais: a banda passante (*passband*), na qual os sinais são transmitidos com baixas perdas, e a banda de rejeição (*stopband*), caracterizada pela elevada atenuação dos sinais incidentes.

A Figura 4 apresenta a resposta em frequência característica de um filtro passa-baixa, destacando a frequência de corte e as regiões de banda passante e banda de rejeição.

Figura 4 - Resposta em frequência de um filtro passa-baixa (LPF).



Fonte: Elaborado pela autora com base em Costa (2024).

Em aplicações de telecomunicações, a qualidade do desempenho de um filtro passa-baixa está diretamente relacionada à sua capacidade de separar eficientemente as frequências desejadas das componentes indesejadas. Nesse contexto, parâmetros como a largura da banda de rejeição, a atenuação obtida após a frequência de corte e a taxa de transição entre as regiões de transmissão e rejeição assumem papel fundamental no processo de projeto.

Um dos parâmetros frequentemente utilizados para avaliar o desempenho desses dispositivos é a taxa de *roll-off*, que descreve a rapidez com que ocorre a transição entre a banda passante e a banda de rejeição. Valores mais elevados de *roll-off* indicam uma mudança mais abrupta na resposta em frequência, resultando em maior seletividade e melhor capacidade de rejeição de componentes espectrais indesejados.

Além disso, em aplicações de RF e micro-ondas, é desejável que os filtros apresentem bandas de rejeição amplas e níveis elevados de atenuação em frequências superiores à frequência de corte. Essa característica contribui para a supressão de harmônicos, redução de interferências eletromagnéticas e melhoria do desempenho geral dos sistemas de comunicação.

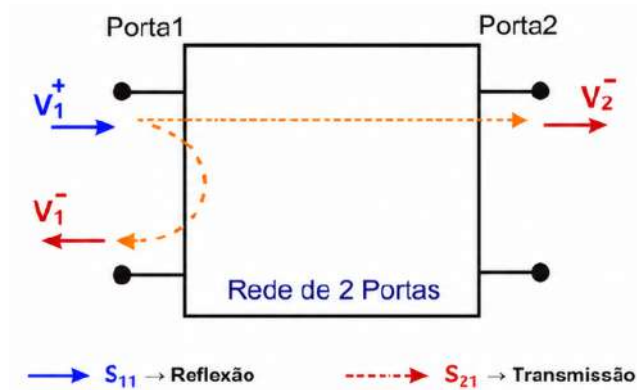
Devido a essas características, os filtros passa-baixa são amplamente empregados em transmissores, receptores e sistemas de processamento de sinais, desempenhando papel essencial no condicionamento espectral dos sinais e na garantia da integridade das informações transmitidas (HONG; LANCASTER, 2001). No contexto deste trabalho, a análise do comportamento de filtros passa-baixa torna-se particularmente relevante, uma vez que a estrutura investigada utiliza elementos ressonantes baseados em *stubs* e estruturas DGS para aprimorar as características de rejeição e seletividade do dispositivo.

2.3 Parâmetros S

Em sistemas de radiofrequência e micro-ondas, a caracterização do comportamento elétrico de dispositivos e circuitos é frequentemente realizada por meio dos parâmetros de espalhamento, conhecidos como parâmetros S (*Scattering Parameters*). Esses parâmetros permitem descrever a propagação, a reflexão e a transmissão de sinais em uma rede sem a necessidade de analisar detalhadamente sua estrutura interna, sendo amplamente empregados na análise de filtros, antenas e circuitos de micro-ondas (POZAR, 2012).

A utilização dos parâmetros S baseia-se no conceito de rede de duas portas, na qual o dispositivo é tratado como uma "caixa preta". Nessa abordagem, considera-se apenas o comportamento dos sinais nas portas de entrada e saída, avaliando-se a parcela de energia refletida e transmitida pelo dispositivo. A Figura 5 apresenta uma representação simplificada deste modelo, destacando as ondas incidentes, refletidas e transmitidas associadas ao processo de propagação do sinal (D'ASSUNÇÃO JÚNIOR, 2024).

Figura 5 – Representação simplificada de uma rede de duas portas utilizada na definição dos parâmetros S.



Fonte: Adaptado de D'Assunção Júnior (2024).

Entre os parâmetros de espalhamento de uma rede de duas portas, os mais relevantes para a análise de filtros são S_{11} e S_{21} . O parâmetro S_{11} representa o coeficiente de reflexão na porta de entrada, indicando a fração da energia incidente que retorna em direção à fonte devido ao descasamento de impedância. Valores reduzidos de S_{11} indicam menor reflexão e melhor adaptação da estrutura à linha de transmissão (POZAR, 2012).

Por outro lado, o parâmetro S_{21} representa o coeficiente de transmissão entre a porta de entrada e a porta de saída, descrevendo a quantidade de energia efetivamente transmitida através do dispositivo. Em filtros passa-baixa, a análise de S_{21} permite identificar características importantes da resposta em frequência, tais como frequência de corte, bandas de transmissão, bandas de rejeição e níveis de atenuação (POZAR, 2012).

No contexto deste trabalho, os parâmetros S_{11} e S_{21} constituem as principais métricas utilizadas para avaliar o desempenho eletromagnético das estruturas estudadas. Por meio da análise desses parâmetros será possível investigar a influência das variações geométricas dos *stubs* e das estruturas DGS Matryoshka sobre a resposta em frequência do filtro, permitindo

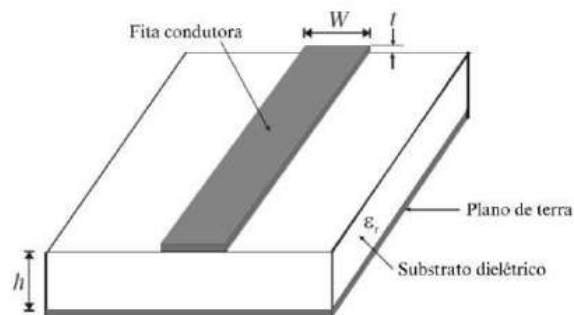
identificar alterações na frequência de ressonância, na banda de rejeição e na seletividade da estrutura.

2.4 Tecnologia Microfita

A tecnologia microfita (*microstrip*) é uma das técnicas mais utilizadas na implementação de circuitos de radiofrequência e micro-ondas, devido à sua simplicidade construtiva, baixo custo de fabricação e facilidade de integração com outros dispositivos planares. Essa tecnologia consiste basicamente em uma fita condutora metálica depositada sobre um substrato dielétrico, enquanto a face oposta do substrato é revestida por um plano de terra condutor, formando uma estrutura capaz de guiar ondas eletromagnéticas em altas frequências (POZAR, 2012; HONG; LANCASTER, 2004).

A estrutura geral de uma linha de microfita é apresentada na Figura 6. Nessa configuração, a propagação dos sinais ocorre por meio dos campos eletromagnéticos distribuídos entre a linha condutora e o plano de terra, sendo influenciada por parâmetros físicos como a largura da linha, a espessura do substrato e a permissividade elétrica relativa do material dielétrico. Essas características determinam propriedades importantes da linha, como sua impedância característica e velocidade de propagação (COSTA, 2024).

Figura 6 - Estrutura geral de uma linha de microfita.



Fonte: COSTA (2024).

Em comparação com outras tecnologias utilizadas em circuitos de micro-ondas, as estruturas em microfita apresentam vantagens significativas, incluindo reduzido peso, facilidade de fabricação por técnicas convencionais de circuito impresso e elevada compatibilidade com sistemas integrados de RF. Tais características tornam essa tecnologia amplamente empregada no desenvolvimento de filtros, acopladores, divisores de potência,

antenas e diversos outros componentes utilizados em sistemas modernos de telecomunicações (HONG; LANCASTER, 2004).

Além dos aspectos construtivos, a tecnologia microfita possibilita a implementação de diferentes técnicas de otimização eletromagnética, incluindo o uso de stubs, ressonadores planares e estruturas DGS, permitindo a obtenção de dispositivos mais compactos e com melhor desempenho em frequência. Essas características têm motivado o desenvolvimento de novas configurações de filtros capazes de apresentar elevada seletividade e amplas bandas de rejeição (POZAR, 2012).

No presente trabalho, o filtro passa-baixa analisado foi implementado utilizando tecnologia microfita, combinando stubs na camada superior de metalização e estruturas DGS-Matryoshka no plano de terra. Dessa forma, a tecnologia microfita constitui a base física sobre a qual são aplicadas as modificações geométricas investigadas, permitindo avaliar como diferentes parâmetros estruturais influenciam o comportamento eletromagnético do dispositivo.

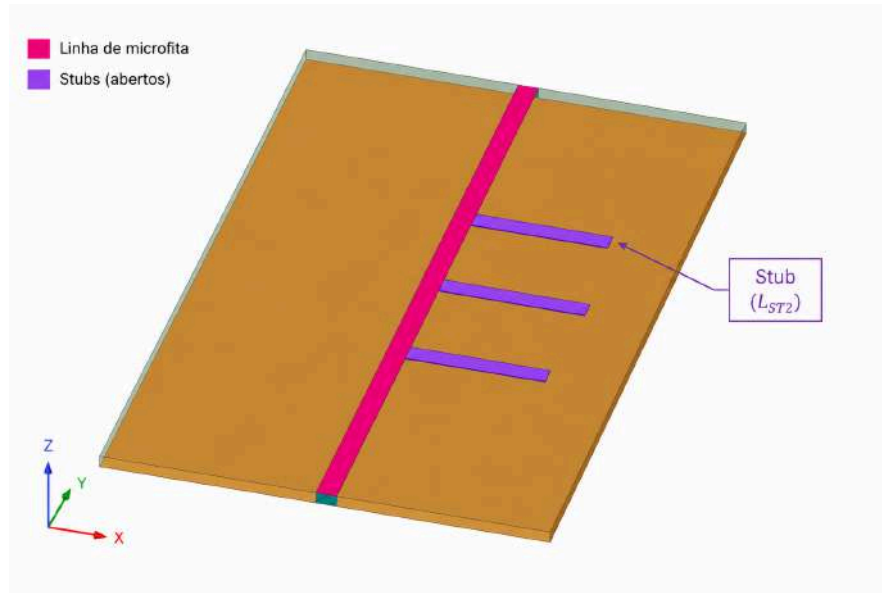
2.5 Stubs em Filtros Planares

Os *stubs* constituem elementos amplamente utilizados em circuitos de micro-ondas e radiofrequência, sendo implementados como trechos de linhas de transmissão conectados à linha principal de propagação do sinal. Dependendo de sua configuração geométrica e de suas dimensões físicas, os stubs podem introduzir efeitos reativos capazes de modificar significativamente o comportamento eletromagnético de uma estrutura, tornando-se ferramentas importantes no projeto de filtros planares, circuitos de casamento de impedância e redes de acoplamento (POZAR, 2012).

Em filtros implementados em tecnologia microfita, os stubs são frequentemente empregados para controlar a resposta em frequência da estrutura, permitindo a introdução de frequências de ressonância e a obtenção de características específicas de transmissão e rejeição. O princípio de funcionamento desses elementos está diretamente relacionado ao comportamento das ondas eletromagnéticas ao longo da linha de transmissão, de modo que a energia armazenada nos campos elétricos e magnéticos produz efeitos equivalentes aos observados em circuitos ressonantes distribuídos (HONG; LANCASTER, 2004).

A Figura 7 apresenta a localização dos stubs na estrutura do filtro estudado, destacando os elementos responsáveis pela introdução das características ressonantes que contribuem para a formação da resposta em frequência do dispositivo.

Figura 7 - Identificação dos stubs presentes na estrutura analisada.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A resposta produzida por um *stub* depende diretamente de seus parâmetros geométricos, especialmente de seu comprimento elétrico. Alterações nessa dimensão modificam as condições de ressonância da estrutura, provocando deslocamentos nas frequências em que ocorrem máximos ou mínimos de transmissão. Dessa forma, o comprimento do *stub* torna-se um parâmetro de projeto capaz de influenciar características importantes do filtro, como frequência de corte, seletividade e comportamento da banda de rejeição (POZAR, 2012).

Em aplicações de filtros passa-baixa, os *stubs* podem ser utilizados para ampliar a capacidade de rejeição de componentes espectrais indesejadas e contribuir para a obtenção de transições mais abruptas entre a banda passante e a banda de rejeição. Quando combinados com outras técnicas de otimização, como o emprego de estruturas DGS, tornam-se elementos importantes para a obtenção de filtros compactos e com desempenho aprimorado em altas frequências (HONG; LANCASTER, 2004).

No filtro analisado neste trabalho, os *stubs* constituem parte fundamental da estrutura responsável pela formação da resposta em frequência do dispositivo. Considerando que as

condições de ressonância estão diretamente relacionadas às dimensões físicas desses elementos, a investigação da influência do comprimento do stub sobre os parâmetros S torna-se relevante para a compreensão dos mecanismos responsáveis pelo comportamento eletromagnético do filtro. Por essa razão, uma das etapas da análise paramétrica desenvolvida neste estudo consiste na avaliação do efeito das variações do comprimento do *stub* sobre a frequência de ressonância e sobre as características de transmissão da estrutura, conforme discutido na seção 4.1.

2.6 Estruturas DGS

As estruturas DGS consistem em perturbações intencionalmente inseridas no plano de terra de circuitos planares, com o objetivo de modificar a propagação das ondas eletromagnéticas ao longo da estrutura. Essas descontinuidades alteram a distribuição das correntes superficiais e dos campos eletromagnéticos presentes no dispositivo, produzindo mudanças em parâmetros elétricos importantes, como indutância, capacitância e impedância equivalentes (COSTA, 2024).

A utilização de DGS tem sido amplamente explorada em aplicações de radiofrequência e micro-ondas devido à sua capacidade de melhorar o desempenho de diversos dispositivos planares, incluindo filtros, antenas e circuitos de micro-ondas. Ao introduzir um defeito controlado no plano de terra, torna-se possível modificar a resposta em frequência da estrutura sem a necessidade de aumentar significativamente suas dimensões físicas, característica particularmente importante em projetos compactos (DANILA, 2023; COSTA, 2024).

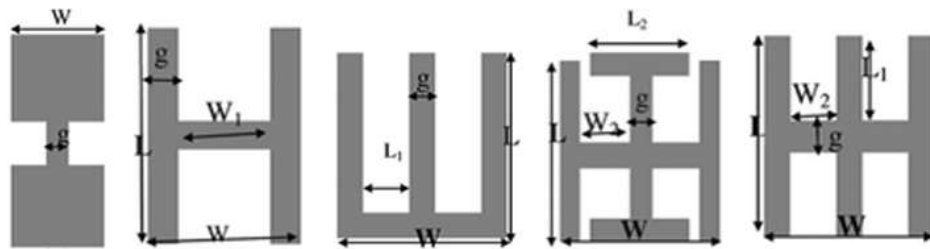
Do ponto de vista eletromagnético, uma DGS apresenta comportamento equivalente ao de um circuito ressonante formado por elementos indutivos e capacitivos distribuídos. Como consequência, determinadas frequências podem sofrer maior atenuação, permitindo a criação de bandas de rejeição mais amplas e a melhoria da seletividade do dispositivo. Essa característica torna as DGS especialmente atrativas para aplicações em filtros passa-baixa que exigem elevada capacidade de rejeição de componentes espectrais indesejadas (POZAR, 2012).

Além da ampliação da banda de rejeição, as DGS também podem contribuir para a obtenção de transições mais abruptas entre a banda passante e a banda de rejeição,

melhorando a taxa de *roll-off* do filtro. Outra vantagem frequentemente observada é a possibilidade de miniaturização de estruturas planares, uma vez que o efeito eletromagnético produzido pelo defeito pode substituir parte do comportamento obtido por elementos convencionais de maiores dimensões (COSTA, 2024).

A Figura 8 apresenta diferentes estruturas DGS utilizadas em filtros planares, ilustrando o conceito de defeito introduzido no plano de terra para modificar a resposta eletromagnética do dispositivo.

Figura 8 - Diferentes formas da estrutura DGS.



Fonte: ELSHEAKH et al., (2010).

No contexto deste trabalho, as DGS desempenham papel fundamental na formação da resposta em frequência do filtro analisado. A investigação da influência de seus parâmetros geométricos constitui uma das etapas centrais da análise paramétrica proposta, uma vez que alterações em suas dimensões podem provocar mudanças significativas nas frequências de ressonância e nas características da banda de rejeição do dispositivo.

2.7 Geometria Matryoshka

A geometria Matryoshka é uma configuração eletromagnética inspirada no conceito das tradicionais bonecas russas, Figura 2, encaixadas umas dentro das outras, caracterizando-se pela utilização de estruturas ressonantes concêntricas e interligadas, Figura 3. Em aplicações de micro-ondas e dispositivos planares impressos, essa abordagem tem se destacado por possibilitar a miniaturização de estruturas ressonantes e a obtenção de múltiplas frequências de ressonância em uma mesma célula unitária.

Segundo Gomes Neto et al. (2024), a geometria Matryoshka pode ser entendida como uma evolução dos *Split Ring Resonators* (SRRs). Enquanto os SRRs convencionais são constituídos por anéis concêntricos separados por aberturas, a configuração Matryoshka

estabelece conexões entre os anéis adjacentes, criando percursos elétricos mais longos para a circulação das correntes induzidas. Esse aumento do comprimento elétrico efetivo reduz a frequência de ressonância sem a necessidade de ampliar significativamente as dimensões físicas da estrutura.

A Figura 9 apresenta a evolução conceitual da geometria, partindo de anéis concêntricos convencionais, passando pelos SRRs e culminando na configuração Matryoshka. A interligação entre os anéis modifica o comportamento eletromagnético da estrutura, permitindo maior compactação e o surgimento de múltiplos modos ressonantes.

Figura 9 – Evolução da geometria Matryoshka (anéis → SRR → Matryoshka).



Fonte: Gomes Neto et al. (2024).

As principais vantagens dessa geometria incluem a miniaturização de dispositivos planares, a obtenção de respostas multibanda ou banda larga e a flexibilidade para adaptação a diferentes aplicações eletromagnéticas. De acordo com Gomes Neto et al. (2024), estruturas baseadas em geometria Matryoshka vêm sendo aplicadas em FSS, filtros planares, antenas e sensores, apresentando resultados promissores principalmente em sistemas de telecomunicações e aplicações associadas às tecnologias sem fio contemporâneas.

No contexto das superfícies seletivas em frequência, a utilização da geometria Matryoshka permite reduzir o tamanho da célula unitária e aumentar o número de frequências ressonantes disponíveis, características particularmente relevantes para projetos multibanda. A combinação entre compactação física e controle da resposta espectral torna essa abordagem uma alternativa atrativa para o desenvolvimento de FSSs destinadas a aplicações em comunicações sem fio, redes móveis e sistemas de monitoramento eletromagnético.

O desenvolvimento e a consolidação dessa linha de pesquisa têm sido conduzidos principalmente pelo GTEMA, do IFPB, responsável pela introdução das geometrias Matryoshka em estruturas planares impressas e por diversos trabalhos que exploram suas aplicações em filtros, antenas, sensores e superfícies seletivas em frequência.

2.8 Influência dos Parâmetros Geométricos

O desempenho eletromagnético de filtros planares está diretamente relacionado à geometria de seus elementos constituintes. Em estruturas baseadas em linhas de microfita, *stubs* e DGS, pequenas alterações dimensionais podem modificar significativamente a distribuição dos campos eletromagnéticos e das correntes induzidas, influenciando parâmetros como frequência de ressonância, frequência de corte, largura da banda de rejeição e níveis de transmissão e reflexão (POZAR, 2012; HONG; LANCASTER, 2004).

No caso dos *stubs*, as propriedades ressonantes da estrutura estão fortemente associadas ao seu comprimento elétrico. Alterações nessa dimensão modificam as condições de propagação das ondas ao longo da linha de transmissão e afetam diretamente as frequências nas quais ocorrem os fenômenos de ressonância. Como consequência, variações no comprimento do *stub* podem provocar deslocamentos das frequências de rejeição e alterar a resposta em frequência do filtro, tornando esse parâmetro uma importante ferramenta de sintonia eletromagnética.

De maneira semelhante, as dimensões geométricas das células DGS exercem influência significativa sobre o comportamento espectral do dispositivo. Como essas estruturas apresentam comportamento equivalente ao de ressonadores distribuídos, modificações em suas dimensões alteram o comprimento elétrico associado aos caminhos percorridos pelas correntes induzidas, deslocando as frequências relacionadas aos mecanismos de rejeição introduzidos no plano de terra. No caso específico das geometrias Matryoshka, a possibilidade de ajuste das dimensões dos anéis interligados permite controlar de forma eficiente as frequências ressonantes da estrutura e, conseqüentemente, sua resposta eletromagnética (GOMES NETO et al., 2024).

Além das características individuais de cada célula DGS, a utilização simultânea de múltiplas estruturas ressonantes pode produzir efeitos adicionais decorrentes do acoplamento eletromagnético entre elas. A interação entre os campos gerados por ressonadores próximos pode resultar no surgimento de novos modos ressonantes, na modificação da profundidade das bandas rejeitadas e no aumento da complexidade da resposta em frequência observada.

Outro parâmetro relevante corresponde ao espaçamento entre as células DGS. A distância entre estruturas ressonantes influencia diretamente o nível de acoplamento

eletromagnético estabelecido entre elas, podendo fortalecer ou enfraquecer a interação entre os modos de ressonância presentes no sistema. Dessa forma, o espaçamento não atua predominantemente sobre as frequências de ressonância individuais, mas sobre a intensidade da interação eletromagnética entre as estruturas, afetando parâmetros como seletividade e profundidade das bandas rejeitadas.

Considerando a forte influência exercida pelos parâmetros geométricos sobre o comportamento eletromagnético de filtros planares, este trabalho propõe uma análise paramétrica da estrutura estudada, investigando os efeitos das variações do comprimento dos *stubs*, das dimensões das células DGS-Matryoshka e do espaçamento entre elas. A compreensão dessas relações permite não apenas caracterizar o comportamento da estrutura analisada, mas também identificar configurações capazes de otimizar sua resposta em frequência e ampliar seu potencial de aplicação em sistemas modernos de telecomunicações.

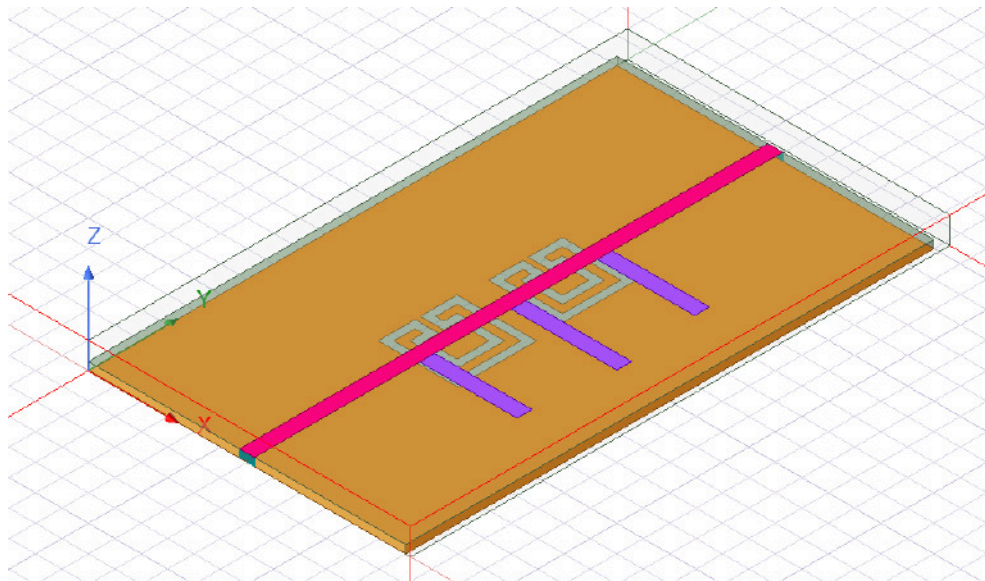
3 METODOLOGIA

3.1 Estrutura de Referência

O desenvolvimento deste trabalho teve como ponto de partida a reprodução computacional de uma estrutura de filtro passa-baixa proposta por Carvalho et al. (2025), baseada na associação de *stubs* e estruturas DGS do tipo Matryoshka implementadas em tecnologia microfita. A escolha desta configuração foi motivada pelas características reportadas pelos autores, incluindo ampla banda de rejeição, elevada seletividade e geometria compacta, tornando-a uma estrutura adequada para investigações na área de filtros planares para aplicações em radiofrequência e micro-ondas.

A estrutura original é composta por uma linha de microfita associada a três *stubs* abertos posicionados na camada superior de metalização e duas células DGS-Matryoshka inseridas no plano de terra, Figura 10.

Figura 10 – Geometria do filtro passa-baixa reproduzido no ANSYS HFSS.

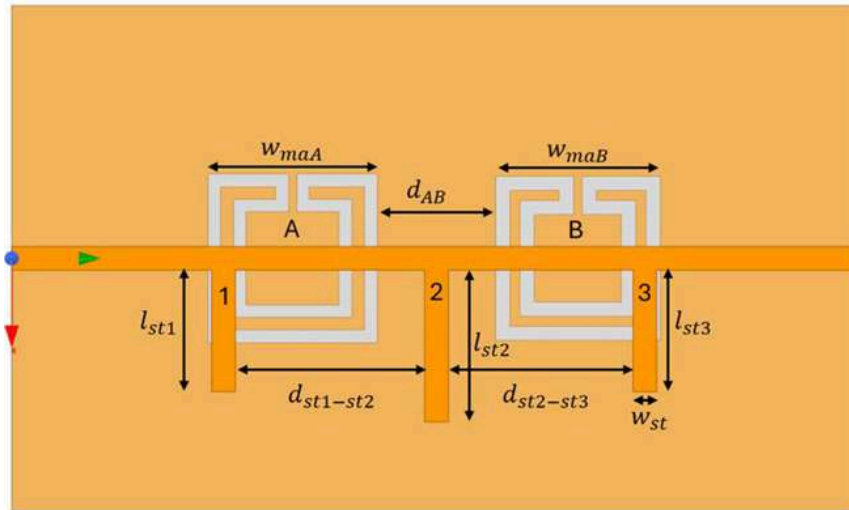


Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A combinação desses elementos permite explorar simultaneamente os efeitos ressonantes produzidos pelos *stubs* e pelas DGS, contribuindo para a formação da resposta característica do filtro passa-baixa.

Com o objetivo de estabelecer uma base confiável para as análises propostas neste TCC, a geometria foi reproduzida no ambiente ANSYS HFSS a partir das dimensões geométricas apresentadas por Carvalho et al. (2025), Figura 11 e Tabela 1.

Figura 11 - Geometria do filtro passa-baixa utilizada como base para reprodução computacional.



Fonte: Extraído de CARVALHO et. al. (2025).

Essa etapa permitiu a obtenção de um modelo computacional compatível com a estrutura de referência descrita na literatura, possibilitando a posterior realização de estudos paramétricos sobre os principais elementos do filtro.

Tabela 1 - Parâmetros geométricos utilizados na modelagem da estrutura proposta.

W_{ma1A}	W_{ma2A}	g_A	W_{mas1A}	W_{mas2A}	W_{ms}
15.0	9.0	1.0	1.5	1.5	2.8
W_{ma1B}	W_{ma2B}	g_B	W_{mas1B}	W_{mas2B}	W_{st}
14.0	8.0	1.0	1.5	1.5	2.8
d_{AB}	$l_{st1,3}$	l_{st2}	$d_{st1-st2}$	$d_{st2-st3}$	
5.4	18.4	20.0	14.5	13.5	

Fonte: Adaptado de CARVALHO et. al. (2025).

A Figura 10 apresenta a geometria completa reproduzida no ambiente de simulação eletromagnética. Observa-se a presença dos três *stubs* conectados à linha principal de

microfita e das duas células DGS-Matryoshka localizadas no plano de terra, elementos responsáveis pela formação das características de transmissão e rejeição do dispositivo.

A reprodução do filtro constituiu uma etapa fundamental para a validação do modelo computacional utilizado neste trabalho. A partir da obtenção de resultados compatíveis com aqueles apresentados por Carvalho et al. (2025), tornou-se possível utilizar a estrutura reproduzida como referência para a realização das análises paramétricas desenvolvidas neste estudo. Dessa forma, as modificações introduzidas posteriormente nos parâmetros geométricos puderam ser avaliadas sobre uma configuração previamente validada, garantindo maior confiabilidade às análises e discussões apresentadas nos capítulos seguintes.

3.2 Ambiente de Simulação

As simulações eletromagnéticas desenvolvidas neste trabalho foram realizadas utilizando o software ANSYS Electronics Desktop 2024 R1, por meio do módulo HFSS. Essa ferramenta é amplamente empregada na análise de dispositivos de radiofrequência e micro-ondas, permitindo a obtenção da resposta eletromagnética de estruturas tridimensionais por meio do Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method* – FEM).

O modelo computacional foi desenvolvido em ambiente tridimensional, possibilitando a representação detalhada da geometria do filtro estudado e a avaliação de seu comportamento eletromagnético em função da frequência. As simulações foram executadas na faixa de 0 a 10 GHz, intervalo suficiente para a análise da banda passante, da frequência de corte e das características da banda de rejeição associadas à estrutura investigada.

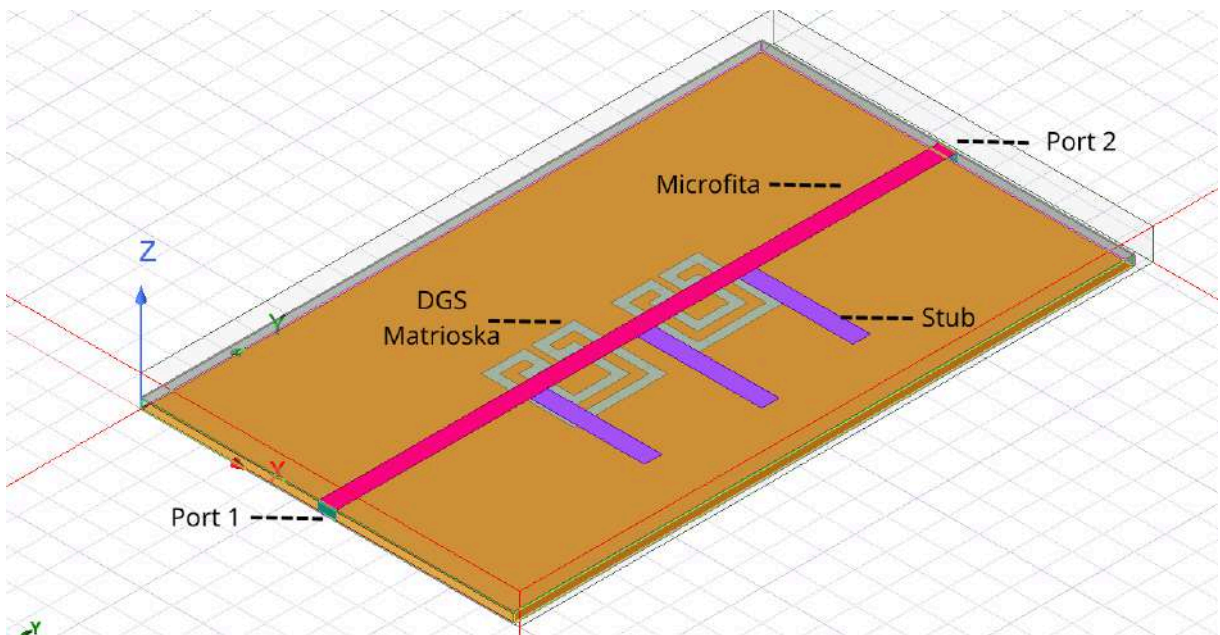
A implementação do filtro foi realizada utilizando tecnologia microfita sobre substrato dielétrico do tipo FR4, com espessura de 1,5 mm e permissividade relativa igual a 4,4. As dimensões geométricas adotadas foram baseadas na estrutura de referência apresentada por Carvalho et al. (2025), reproduzida conforme descrito na seção 3.1.

A excitação do modelo foi realizada por meio de duas Lumped Ports posicionadas nas extremidades da linha de microfita, representando as portas de entrada e saída do dispositivo. A partir dessas portas foram obtidos os parâmetros S utilizados para a caracterização do filtro, especialmente os parâmetros S11 e S21, empregados na análise das características de reflexão e transmissão da estrutura.

Para representar adequadamente a propagação dos campos eletromagnéticos no espaço livre e minimizar reflexões artificiais durante o processo numérico, a estrutura foi envolvida por uma região de ar (*Air Box*) associada à condição de contorno do tipo *Radiation Boundary*. Essa configuração permite simular de forma mais realista o comportamento eletromagnético do dispositivo, reduzindo interferências decorrentes dos limites computacionais do domínio de análise.

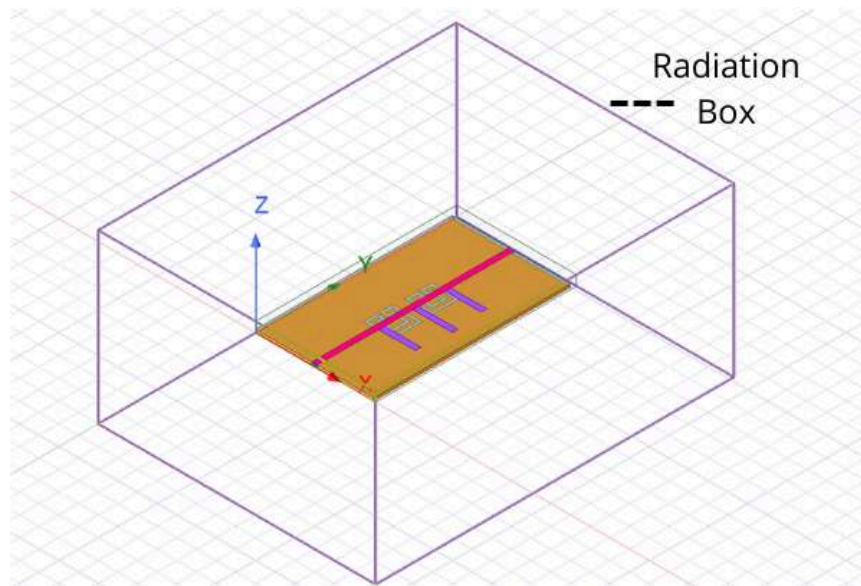
As Figuras 12 e 13 apresentam o ambiente de simulação utilizado neste trabalho, destacando a geometria do filtro, as portas de excitação e a região de ar empregada para a definição das condições de contorno.

Figura 12 - Geometria do filtro reproduzido no ANSYS HFSS com identificação dos principais elementos da estrutura.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 13 - Configuração da simulação eletromagnética destacando a caixa de radiação utilizada nas análises.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A utilização do HFSS permitiu a obtenção dos parâmetros eletromagnéticos necessários para a validação da estrutura reproduzida e para a realização das análises paramétricas propostas neste TCC, fornecendo uma base confiável para a investigação da influência dos parâmetros geométricos sobre o desempenho do filtro.

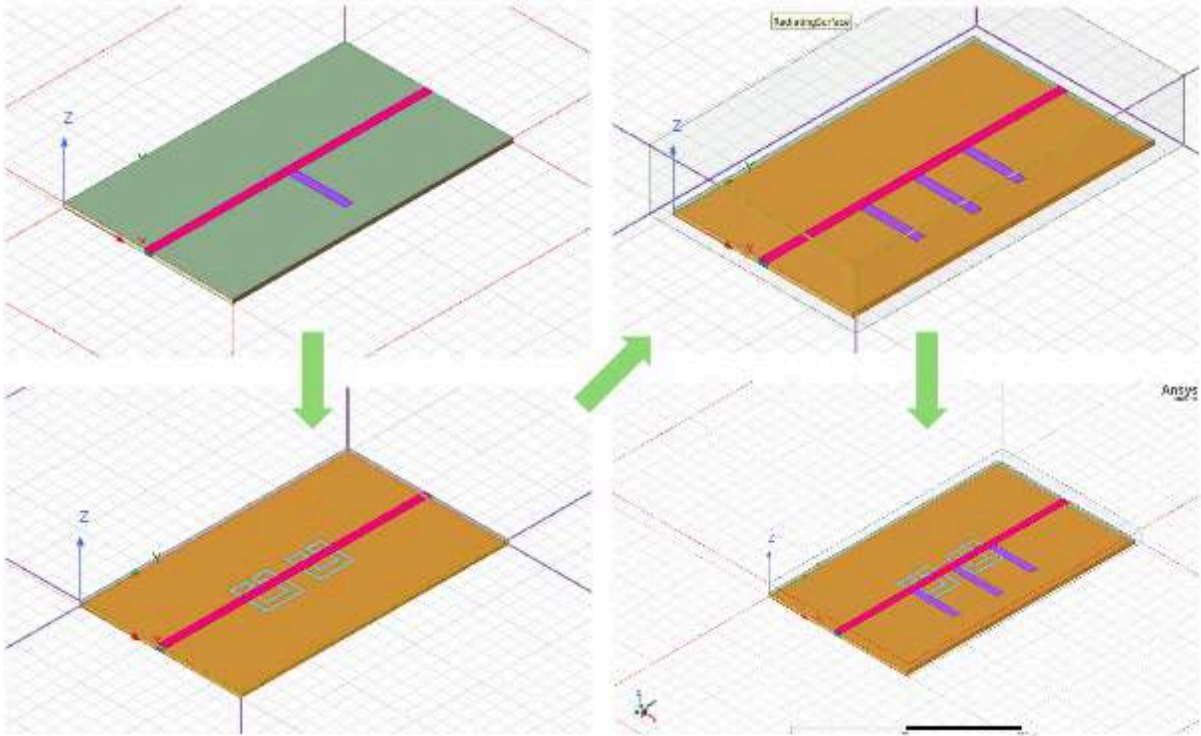
3.3 Reprodução do Filtro

Antes da realização das análises paramétricas propostas neste trabalho, foi efetuada a reprodução computacional da estrutura apresentada por Carvalho et al. (2025), com o objetivo de validar o modelo desenvolvido no ambiente ANSYS HFSS. Essa etapa foi considerada fundamental para garantir que as características eletromagnéticas observadas nas simulações estivessem em concordância com aquelas reportadas pelos autores da estrutura de referência.

A estratégia adotada consistiu na reprodução gradual dos principais elementos que compõem o filtro, seguindo a mesma sequência apresentada no artigo original. Inicialmente, foi analisada a estrutura contendo apenas um stub conectado à linha de microfita. Em seguida, foram avaliadas as duas células DGS-Matryoshka isoladamente, posteriormente a configuração contendo três stubs e, por fim, o filtro completo, composto pela associação de todos os elementos.

A Figura 14 apresenta as principais estruturas reproduzidas durante o processo de validação do modelo computacional.

Figura 14 - Evolução geométrica das etapas de modelagem desenvolvidas para reprodução do filtro estudado.



Fonte: Elaborado pela Autora (2026).

A Tabela 2 resume os objetivos associados à análise de cada configuração estudada.

Tabela 2 - Objetivos da análise de cada configuração estudada.

Estrutura	Objetivo da análise
1 <i>stub</i>	Avaliar o comportamento ressonante individual do stub
2 DGS Matryoshka	Avaliar a contribuição das células DGS
3 <i>stubs</i>	Avaliar o efeito conjunto dos stubs
Filtro completo	Validar a reprodução da estrutura original

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A análise individual das estruturas permitiu compreender a contribuição eletromagnética de cada elemento para a resposta global do filtro. Além disso, essa

abordagem facilitou a identificação dos mecanismos responsáveis pela formação das frequências de ressonância, da banda de rejeição e das características de transmissão observadas no dispositivo completo.

Após a reprodução das diferentes configurações, os resultados obtidos foram comparados qualitativamente com aqueles apresentados por Carvalho et al. (2025). Verificou-se compatibilidade entre as respostas em frequência observadas, incluindo a posição das principais ressonâncias, a frequência de corte e o comportamento geral da banda de rejeição. As pequenas diferenças encontradas foram consideradas aceitáveis e atribuídas a fatores inerentes ao processo de simulação numérica, tais como discretização da malha, aproximações do modelo computacional e diferenças associadas aos parâmetros efetivos do substrato.

A concordância observada entre os resultados simulados e aqueles reportados na literatura permitiu considerar o modelo adequadamente validado. Dessa forma, a estrutura reproduzida passou a ser utilizada como referência para a realização das análises paramétricas desenvolvidas neste trabalho, apresentadas nos capítulos subsequentes.

3.4 Procedimento de Análise Paramétrica

Após a reprodução e validação da estrutura de referência descrita no artigo selecionado, foram realizados estudos paramétricos com o objetivo de investigar a influência de diferentes parâmetros geométricos sobre o comportamento eletromagnético do filtro proposto. A estratégia adotada consistiu na variação controlada de parâmetros específicos da geometria, mantendo-se inalteradas as demais características estruturais do dispositivo, de modo a permitir a avaliação isolada da contribuição de cada elemento para a resposta em frequência.

Todas as simulações foram realizadas no ambiente ANSYS HFSS, utilizando o módulo Optimetrics para a execução dos estudos paramétricos. Para cada parâmetro analisado, foi definido um conjunto de valores dentro de uma faixa de interesse previamente estabelecida, sendo executadas simulações independentes para cada configuração geométrica. Os resultados obtidos foram posteriormente comparados por meio das curvas dos parâmetros de espalhamento, permitindo identificar alterações no comportamento espectral do filtro em função das modificações introduzidas.

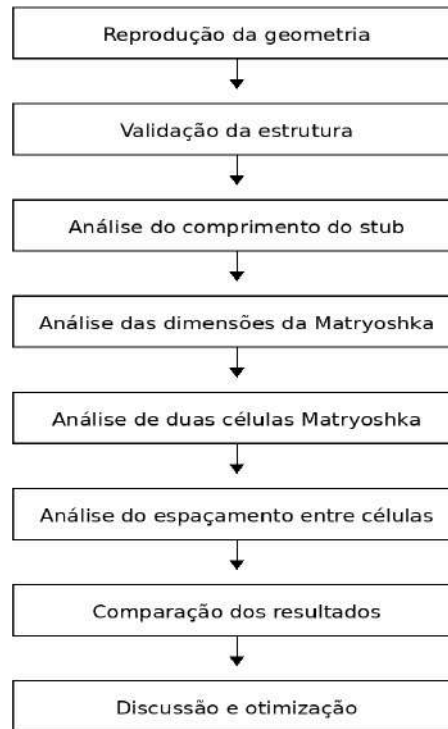
A metodologia empregada foi dividida em etapas sucessivas, ilustradas na Figura 15. Inicialmente, foi analisada a influência do comprimento do stub principal da estrutura, uma vez que esse elemento atua diretamente sobre o comprimento elétrico do filtro e, conseqüentemente, sobre suas frequências de ressonância. Em seguida, foram investigadas as dimensões das estruturas DGS do tipo Matryoshka, buscando avaliar sua influência sobre o posicionamento das bandas de rejeição introduzidas na resposta em frequência.

Posteriormente, foi estudado o efeito da utilização simultânea de duas células Matryoshka, com o objetivo de analisar os fenômenos de acoplamento eletromagnético entre estruturas ressonantes e seus impactos sobre a resposta espectral do dispositivo. Por fim, foi realizada uma análise paramétrica do espaçamento entre as células DGS, visando avaliar sua influência sobre a intensidade do acoplamento eletromagnético, a profundidade das bandas rejeitadas e o desempenho global do filtro.

Para cada configuração simulada, foram analisadas as curvas dos parâmetros de espalhamento, com especial atenção ao parâmetro S_{21} , utilizado para caracterizar o comportamento de transmissão do filtro. A partir dessas curvas foram identificadas as frequências de rejeição, os níveis máximos de atenuação, os deslocamentos espectrais e as alterações associadas aos mecanismos de acoplamento eletromagnético presentes na estrutura. Esses resultados permitiram quantificar a influência de cada parâmetro geométrico sobre a resposta em frequência do dispositivo e estabelecer comparações entre as diferentes configurações analisadas.

A adoção desse procedimento permitiu estabelecer relações entre os parâmetros geométricos da estrutura e seu desempenho eletromagnético, possibilitando identificar os mecanismos responsáveis pelo deslocamento das frequências de rejeição, pela variação da profundidade das bandas rejeitadas e pelos efeitos de acoplamento entre células DGS. Além de caracterizar o comportamento da estrutura reproduzida, a análise paramétrica possibilitou identificar configurações capazes de apresentar desempenho superior ao observado na geometria originalmente proposta no trabalho de referência.

Figura 15 - Fluxograma do procedimento de análise paramétrica adotado neste trabalho.



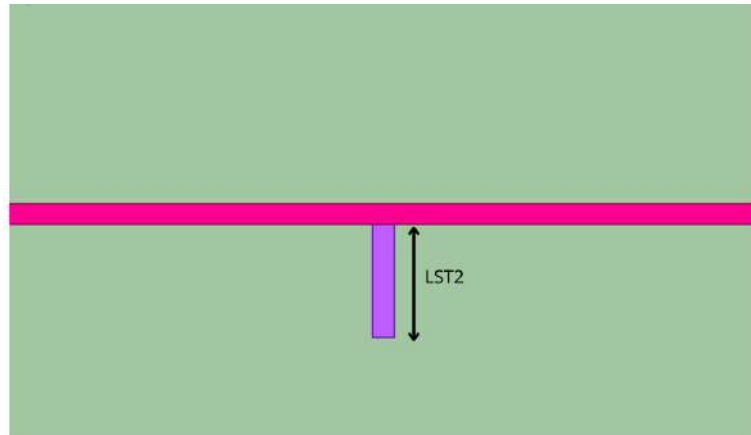
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

3.5 Parâmetros Geométricos Avaliados

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas análises paramétricas com o objetivo de investigar a influência das principais dimensões geométricas sobre a resposta em frequência do filtro passa-baixa baseado em estruturas DGS do tipo Matryoshka. Os parâmetros selecionados foram definidos de modo a representar elementos diretamente associados aos mecanismos de ressonância e acoplamento eletromagnético presentes na estrutura.

A Figura 12 apresenta a geometria reproduzida no ANSYS HFSS com a identificação dos principais elementos estruturais do filtro, enquanto as Figuras 16, 17, 18 e 19 destacam os parâmetros geométricos investigados nas análises paramétricas realizadas neste trabalho. Inicialmente, foi analisada a influência do comprimento do *stub* em aberto conectado à linha de transmissão. Esse elemento desempenha papel fundamental na formação das bandas de rejeição, uma vez que atua como um ressonador distribuído capaz de modificar a resposta de transmissão do filtro em determinadas frequências.

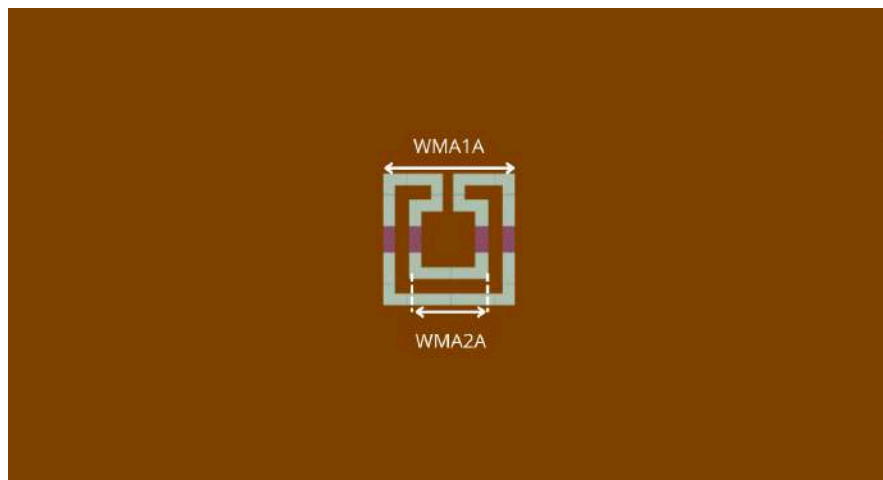
Figura 16 - Identificação do parâmetro LST2 utilizado na análise da influência do comprimento do stub sobre a resposta em frequência do filtro.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Em uma segunda etapa, foi realizada uma análise paramétrica considerando uma configuração contendo apenas uma célula DGS do tipo Matryoshka. Nessa análise, os parâmetros WMA1A e WMA2A, figura 17, foram utilizados para controlar as dimensões dos anéis ressonantes, permitindo avaliar a influência das dimensões da estrutura sobre as frequências de rejeição observadas.

Figura 17 - Parâmetros geométricos considerados na análise da célula Matryoshka individual.

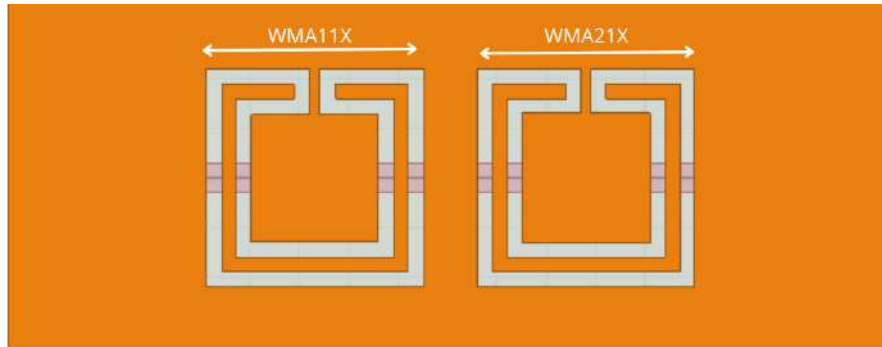


Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Posteriormente, foi analisada a geometria originalmente reproduzida a partir do trabalho de referência, composta por duas células Matryoshka. Nessa configuração, os parâmetros WMA11X e WMA21X foram variados simultaneamente, possibilitando investigar

os efeitos associados à utilização de múltiplos ressonadores e ao acoplamento eletromagnético entre as estruturas DGS.

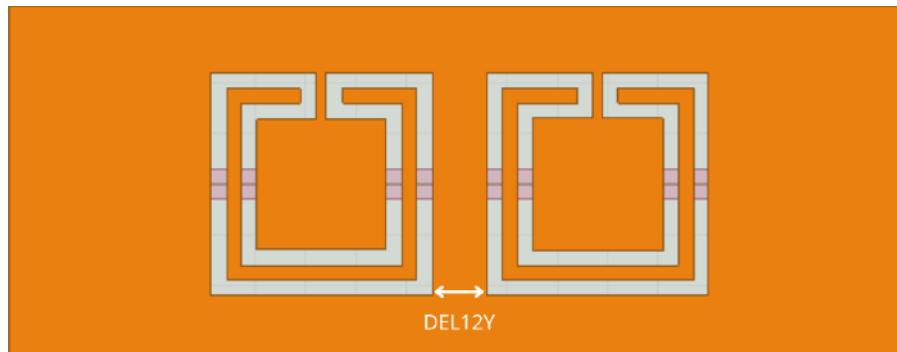
Figura 18 - Parâmetros geométricos considerados na análise da configuração com duas células Matryoshka.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Por fim, foi analisado o parâmetro DEL12Y, figura 19, responsável pelo espaçamento entre as duas células Matryoshka. A variação desse parâmetro permitiu investigar a influência do acoplamento eletromagnético entre os ressonadores, avaliando seu impacto sobre a profundidade das bandas rejeitadas e sobre o comportamento geral do dispositivo.

Figura 19 - Identificação do parâmetro DEL12Y correspondente ao espaçamento entre as células DGS do tipo Matryoshka.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A Tabela 3 apresenta um resumo dos parâmetros geométricos avaliados e dos respectivos intervalos de variação considerados durante as análises paramétricas.

Tabela 3 - Parâmetros geométricos avaliados durante as simulações.

Parâmetro	Descrição	Intervalo Avaliado
<i>Stub</i>	Comprimento da seção em aberto conectada à linha de transmissão	12 mm a 24 mm
WMA1A e WMA2A	Dimensões da célula Matryoshka individual	13 mm a 17 mm e 7 mm a 11 mm
WMA11X e WMA21X	Dimensões das duas células Matryoshka	13 mm a 22 mm
DEL12Y	Espaçamento entre as células Matryoshka	2 mm a 11 mm

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Os intervalos de variação foram definidos de forma a permitir a observação dos efeitos produzidos por cada parâmetro sobre a resposta eletromagnética do filtro, possibilitando a avaliação da influência dessas variáveis sobre as frequências de rejeição, os níveis de atenuação e o comportamento espectral da estrutura. A análise sistemática desses parâmetros foi utilizada como base para a interpretação dos resultados apresentados no Capítulo 4, permitindo investigar os mecanismos físicos associados às alterações observadas e identificar configurações com potencial para apresentar desempenho superior ao da geometria originalmente reproduzida.

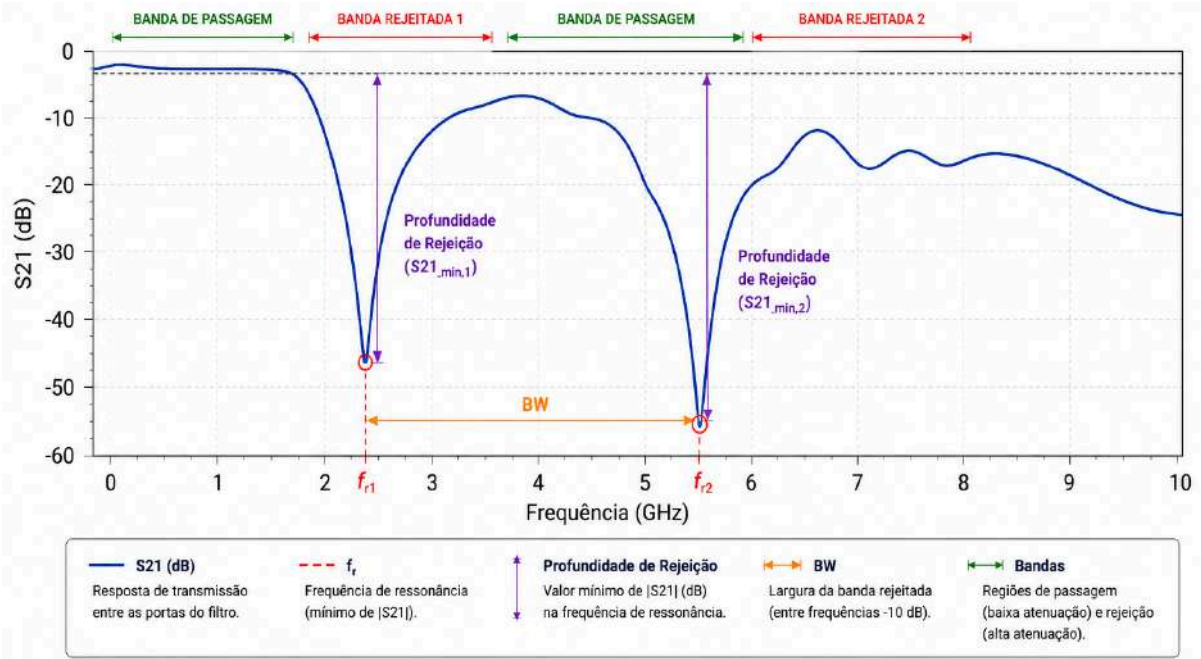
3.6 Parâmetros Eletromagnéticos Analisados

Durante as simulações realizadas neste trabalho, foram analisados parâmetros eletromagnéticos capazes de caracterizar o comportamento do filtro passa-baixa e avaliar a influência das modificações geométricas introduzidas na estrutura. A análise concentrou-se principalmente no parâmetro de espalhamento S21, por representar diretamente a transmissão de potência entre as portas do dispositivo.

O parâmetro S21 foi obtido em função da frequência ao longo da faixa de operação considerada nas simulações, permitindo identificar as regiões de passagem e rejeição do filtro. A partir dessas curvas, foram extraídas informações relacionadas às frequências ressonantes, às frequências centrais das bandas rejeitadas e aos níveis de atenuação produzidos pelas estruturas DGS.

A Figura 20 ilustra os principais parâmetros utilizados na interpretação dos resultados obtidos ao longo das análises paramétricas.

Figura 20 - Principais parâmetros eletromagnéticos utilizados na interpretação das curvas de transmissão (S21), incluindo frequências de rejeição, bandas rejeitadas e profundidade de rejeição.



Fonte: Elaborado pela Autora com auxílio do ChatGPT (OpenAI) (2026).

A frequência de ressonância corresponde à frequência na qual ocorre o mínimo local da curva de transmissão, representando a condição em que a estrutura ressonante apresenta maior capacidade de bloquear a propagação do sinal. Já a profundidade de rejeição está associada ao valor mínimo atingido pelo parâmetro S21, sendo utilizada para quantificar a eficiência da rejeição produzida pelo filtro.

Além disso, foi analisado o deslocamento das frequências ressonantes em função das variações geométricas introduzidas na estrutura. Esse parâmetro permitiu avaliar a sensibilidade das bandas rejeitadas às alterações dimensionais realizadas nos *stubs*, nas células Matryoshka e no espaçamento entre as estruturas DGS.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos principais parâmetros eletromagnéticos considerados durante a análise dos resultados.

Tabela 4 - Parâmetros eletromagnéticos avaliados nas simulações.

Parâmetro	Descrição	Aplicação na análise
S21	Coeficiente de transmissão entre as portas	Avaliação da resposta em frequência do filtro
Frequência de ressonância	Frequência correspondente ao mínimo local de S21	Identificação das bandas rejeitadas
Profundidade de rejeição	Valor mínimo de S21 em determinada banda	Quantificação da eficiência de rejeição
Deslocamento espectral	Variação da frequência de ressonância	Avaliação da influência dos parâmetros geométricos
Número de bandas rejeitadas	Quantidade de mínimos ressonantes observados	Caracterização do comportamento do filtro

Fonte: Elaborado pela Autora (2026).

Os parâmetros apresentados foram utilizados de forma complementar ao longo das análises paramétricas realizadas neste trabalho, permitindo correlacionar as alterações geométricas da estrutura com as modificações observadas na resposta eletromagnética do filtro. A partir dessas informações, foi possível identificar os mecanismos responsáveis pela formação das bandas rejeitadas e determinar as configurações que proporcionaram os melhores níveis de atenuação.

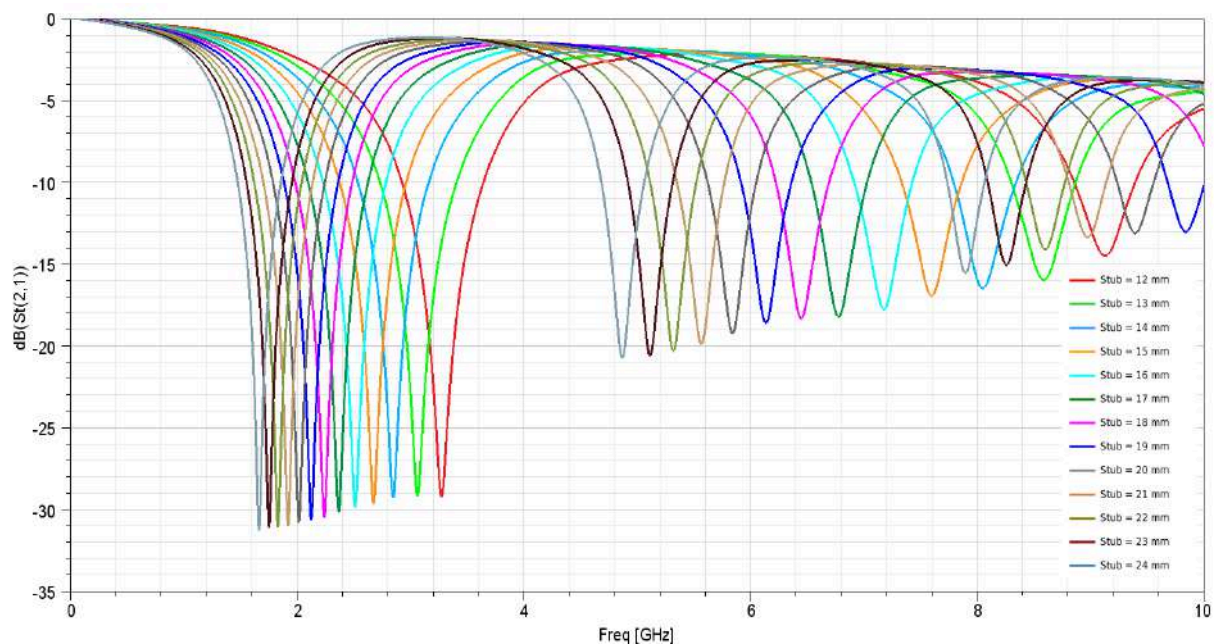
4 RESULTADOS

4.1 Influência do Comprimento do Stub

Com o objetivo de investigar a influência dos parâmetros geométricos sobre o comportamento eletromagnético da estrutura analisada, foi realizada inicialmente uma análise paramétrica do comprimento do stub, representado pela variável LST2. Para essa avaliação, o comprimento do stub foi variado entre 12 mm e 24 mm, com incrementos de 1 mm, mantendo-se constantes os demais parâmetros geométricos da estrutura.

A Figura 21 apresenta os resultados obtidos para o parâmetro de transmissão S21 em função da frequência para os diferentes valores de LST2 analisados.

Figura 21 - Influência do comprimento do stub na resposta em frequência do filtro.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Observa-se que a variação do comprimento do stub provoca deslocamentos significativos nas frequências de ressonância da estrutura. À medida que o valor de LST2 aumenta, os *notches* observados na resposta em frequência deslocam-se progressivamente para frequências menores, evidenciando a forte influência desse parâmetro sobre o comportamento eletromagnético do dispositivo.

Para quantificar esse efeito, foi determinada a frequência correspondente ao primeiro *notch* de cada curva simulada. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5.

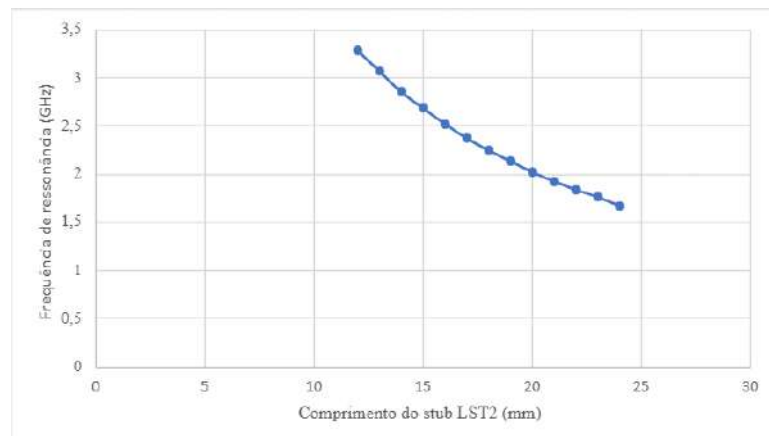
Tabela 5 - Frequência de ressonância em função do comprimento do stub.

LST2 (mm)	Frequência de ressonância (GHz)
12	3,277
13	3,062
14	2,846
15	2,676
16	2,516
17	2,366
18	2,241
19	2,126
20	2,016
21	1,921
22	1,831
23	1,756
24	1,666

Fonte: Elaborado pela Autora (2026).

A partir dos dados apresentados na Tabela 5, foi construído o gráfico da Figura 22, que relaciona diretamente o comprimento do stub com a frequência de ressonância observada.

Figura 22 - Frequência de ressonância em função do comprimento do stub (LST2).



Fonte: Elaborado pela Autora (2026).

A Figura 22 evidencia uma relação inversa entre o comprimento do *stub* e a frequência de ressonância da estrutura. Verifica-se que o aumento progressivo de LST2 resulta em uma redução contínua da frequência associada ao primeiro *notch* observado na resposta em frequência.

Observa-se ainda que a profundidade dos *notches* permaneceu próxima de 30 dB ao longo das diferentes configurações avaliadas, indicando que a principal influência do parâmetro LST2 está associada ao reposicionamento espectral das bandas rejeitadas, e não à intensidade do mecanismo de rejeição.

Os resultados apresentados corroboram a hipótese inicialmente formulada para esta análise, segundo a qual o aumento do comprimento do *stub* deslocaria as frequências de ressonância para valores menores. Esse comportamento já era esperado do ponto de vista eletromagnético, uma vez que estruturas ressonantes mais longas tendem a operar em frequências mais baixas devido ao aumento do comprimento elétrico associado à propagação do sinal.

O comportamento observado está em concordância com a teoria apresentada na Seção 2.5, segundo a qual os *stubs* atuam como elementos reativos capazes de introduzir frequências ressonantes específicas na estrutura. O aumento do comprimento do *stub* eleva seu comprimento elétrico efetivo, alterando as condições de ressonância e deslocando os *notches* para frequências menores, conforme discutido por Jia-Sheng Hong e Michael J. Lancaster.

Comparando os extremos da análise, observa-se que o aumento do comprimento do *stub* de 12 mm para 24 mm provocou uma redução da frequência de ressonância de aproximadamente 3,277 GHz para 1,666 GHz, correspondendo a uma diminuição próxima de 49%. Tal resultado demonstra que pequenas alterações geométricas podem produzir mudanças significativas na resposta em frequência do dispositivo.

Além disso, a variação observada evidencia a elevada sensibilidade do parâmetro LST2, reforçando sua relevância em processos de sintonia e otimização da resposta em frequência do filtro. Essa característica é particularmente importante em projetos de filtros planares, nos quais ajustes geométricos relativamente simples podem ser utilizados para controlar o posicionamento das frequências ressonantes e adequar o dispositivo às especificações desejadas.

Dessa forma, conclui-se que o parâmetro LST2 constitui um mecanismo efetivo de sintonia das bandas rejeitadas do filtro, permitindo o controle da posição das frequências de rejeição por meio de ajustes geométricos relativamente simples.

4.2 Análise Paramétrica da Estrutura Matryoshka

Após a validação da geometria reproduzida a partir do trabalho de referência, foi realizada uma análise paramétrica da estrutura Matryoshka com o objetivo de investigar a influência de suas dimensões sobre o comportamento eletromagnético do filtro. Esta etapa buscou compreender a relação entre os parâmetros geométricos dos anéis ressonantes e o posicionamento das bandas de rejeição, possibilitando a identificação de configurações potencialmente mais adequadas para aplicações específicas.

Foram selecionados os parâmetros WMA1A e WMA2A, figura 17, responsáveis pelas dimensões dos anéis externo e interno da estrutura Matryoshka, respectivamente. A variação foi realizada de forma simultânea, mantendo-se constante a diferença dimensional entre os dois anéis, conforme apresentado na Tabela 6.

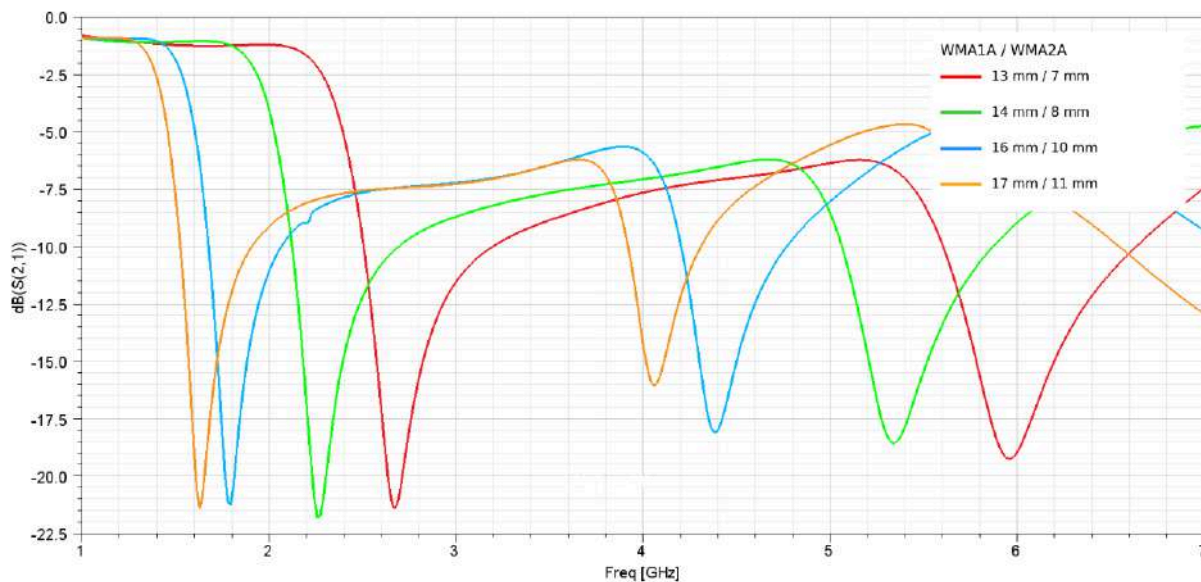
Tabela 6 - Configurações analisadas para a estrutura Matryoshka.

Caso	WMA1A (mm)	WMA2A (mm)
1	13	7
2	14	8
3	16	10
4	17	11

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A Figura 23 apresenta os parâmetros de transmissão obtidos para as diferentes configurações avaliadas.

Figura 23 - Influência das dimensões da célula Matryoshka na resposta em frequência do filtro.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Observa-se que o aumento das dimensões da estrutura Matryoshka provoca um deslocamento sistemático das bandas de rejeição para frequências mais baixas. Esse comportamento era esperado, uma vez que o aumento do comprimento elétrico dos ressonadores resulta na redução de suas frequências naturais de ressonância.

Para quantificar esse efeito, foram identificadas as frequências correspondentes aos mínimos das curvas de transmissão para cada configuração analisada, Tabela 7.

Tabela 7 - Frequências de rejeição obtidas para cada configuração.

WMA1A (mm)	WMA2A (mm)	1ª frequência rejeitada (GHz)	S21 (dB)	2ª frequência rejeitada (GHz)	S21 (dB)
13	7	2,665	-21,35	5,950	-19,23
14	8	2,260	-21,79	5,335	-18,55
16	10	1,795	-21,25	4,390	-18,08
17	11	1,630	-21,39	4,060	-16,05

Fonte: Elaborado pela Autora (2026).

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o aumento das dimensões da estrutura Matryoshka promove um deslocamento sistemático das bandas de rejeição para frequências mais baixas. Observa-se que a primeira frequência de rejeição deslocou-se de aproximadamente 2,67 GHz para 1,63 GHz quando os parâmetros WMA1A e WMA2A foram aumentados de 13 mm e 7 mm para 17 mm e 11 mm, respectivamente. Comportamento semelhante foi identificado para a segunda frequência de rejeição, que passou de aproximadamente 5,95 GHz para 4,06 GHz ao longo das configurações analisadas.

Comparando-se os extremos analisados, observa-se uma redução aproximada de 38,8% na primeira frequência rejeitada e de 31,8% na segunda frequência rejeitada. Esses resultados evidenciam a elevada capacidade de sintonia proporcionada pelas dimensões da estrutura Matryoshka.

Os resultados obtidos confirmam que os parâmetros geométricos da estrutura Matryoshka atuam diretamente sobre as frequências ressonantes do sistema, permitindo o ajuste das bandas rejeitadas sem a necessidade de modificações na geometria global do filtro. Tal resultado está de acordo com o comportamento esperado para estruturas ressonantes empregadas em antenas UWB com características de rejeição de banda. De maneira semelhante ao observado em trabalhos que utilizam ressonadores do tipo Split Ring Resonator (SRR) e Complementary Split Ring Resonator (CSRR), o aumento das dimensões físicas da estrutura resulta em um aumento do comprimento elétrico percorrido pelas correntes induzidas, ocasionando a redução das frequências de ressonância.

Além do deslocamento das bandas rejeitadas, observou-se que a profundidade dos mínimos permaneceu relativamente constante, situando-se próxima de 20 dB em todas as configurações avaliadas. A configuração correspondente a WMA1A = 14 mm e WMA2A = 8 mm apresentou a maior profundidade de rejeição na primeira banda analisada, atingindo aproximadamente -21,8 dB. Entretanto, as diferenças observadas entre os níveis máximos de rejeição foram relativamente pequenas quando comparadas ao deslocamento das frequências de rejeição obtido com a variação geométrica.

Dessa forma, conclui-se que a principal influência dos parâmetros estudados está associada ao reposicionamento espectral das bandas rejeitadas, enquanto o nível de rejeição sofre alterações menos significativas. Os resultados demonstram ainda que a estrutura Matryoshka apresenta elevada sensibilidade às dimensões dos seus anéis ressonantes,

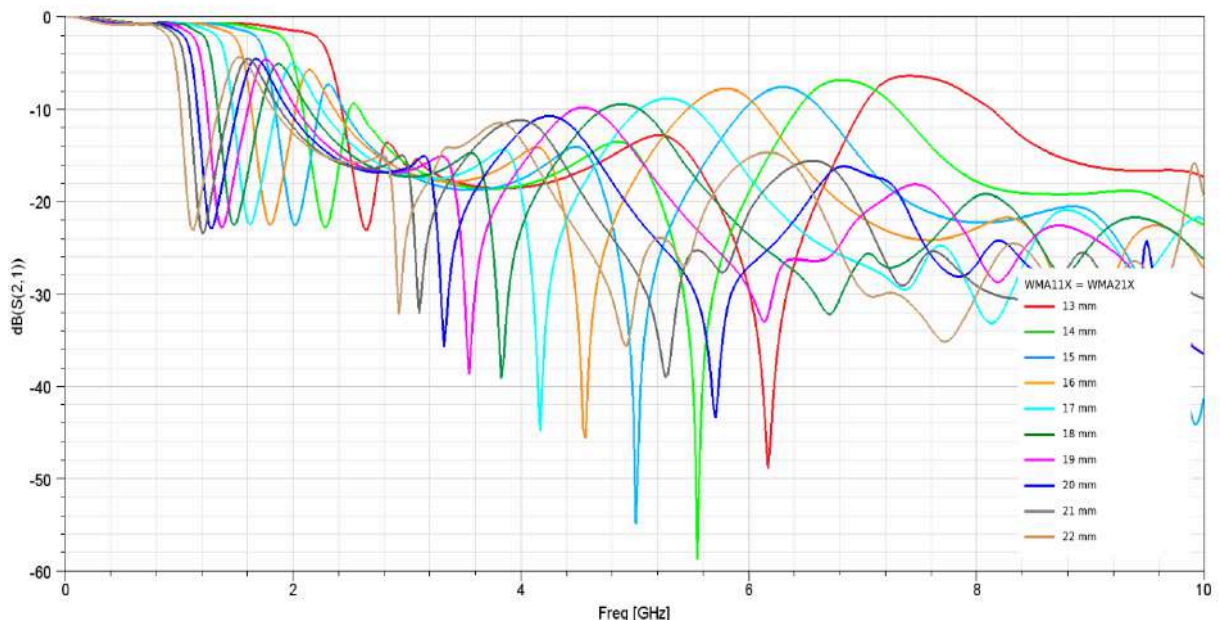
possibilitando o deslocamento controlado das bandas rejeitadas ao longo da faixa de operação do filtro. Essa característica torna a geometria particularmente interessante para aplicações que demandam rejeição seletiva de interferências em diferentes bandas de frequência e evidencia o potencial da estrutura para futuras etapas de otimização, visando à obtenção de configurações com desempenho superior ao observado na geometria originalmente reproduzida.

4.3 Influência da Utilização de Duas Células DGS

Com o objetivo de avaliar o efeito da utilização simultânea de duas estruturas DGS do tipo Matryoshka, foi realizada uma análise paramétrica variando-se igualmente as dimensões das duas células ressonantes. Para isso, os parâmetros WMA11X e WMA21X, figura 18, foram modificados simultaneamente de 13 mm a 22 mm, mantendo-se inalteradas as demais dimensões da geometria.

A Figura 24 apresenta a resposta em frequência do parâmetro S21 para os diferentes valores analisados.

Figura 24 - Influência das dimensões das células Matryoshka (WMA11X e WMA21X) na resposta em frequência do filtro.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Observa-se que a presença de duas células Matryoshka produz um comportamento significativamente distinto daquele observado na análise de uma única célula apresentada na

Seção 4.2. Enquanto no caso anterior predominava o deslocamento de duas bandas de rejeição bem definidas, a utilização simultânea de duas estruturas acopladas introduziu múltiplos modos ressonantes ao longo da faixa de frequência analisada.

Conforme pode ser observado na Figura 24, o aumento das dimensões das estruturas Matryoshka promoveu o deslocamento das frequências de rejeição para valores mais baixos, comportamento esperado em estruturas ressonantes desse tipo. Tal resultado ocorre em razão do aumento do comprimento elétrico efetivo percorrido pelas correntes induzidas, reduzindo consequentemente a frequência de ressonância do sistema.

Os principais resultados obtidos são apresentados na Tabela 8. Verifica-se que a configuração correspondente a $WMA11X = WMA21X = 14$ mm apresentou o melhor desempenho dentre os casos avaliados, atingindo uma rejeição de aproximadamente $-58,65$ dB em 5,55 GHz. Esse valor representa a maior profundidade de rejeição observada durante a análise paramétrica, indicando forte acoplamento eletromagnético entre as duas células DGS.

Tabela 8 - Frequências e níveis de rejeição obtidos para diferentes dimensões das células Matryoshka.

WMA11X = WMA21X (mm)	Frequência de rejeição principal (GHz)	S21 (dB)
13	6,17	-48,83
14	5,55	-58,65
15	5,01	-54,92
16	4,57	-45,61
17	4,17	-44,72
18	3,83	-39,09
19	3,55	-38,68
20	5,71	-43,46
21	5,27	-39,00
22	4,93	-35,67

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Observa-se ainda que a tendência de deslocamento das frequências de rejeição para valores menores ocorre de forma consistente entre as configurações de 13 mm e 19 mm. Para dimensões superiores, verifica-se uma alteração do modo ressonante dominante, resultando na identificação de mínimos associados a outras frequências de rejeição presentes na resposta do filtro. Esse comportamento evidencia a maior complexidade espectral introduzida pela utilização simultânea de duas células Matryoshka e o surgimento de múltiplos mecanismos de ressonância decorrentes do acoplamento eletromagnético entre as estruturas.

Além do aumento da profundidade das bandas rejeitadas, observa-se o aparecimento de novos modos ressonantes distribuídos ao longo da faixa de frequências analisada. Esse comportamento é compatível com o observado em estruturas ressonantes acopladas descritas na literatura, nas quais a interação eletromagnética entre ressonadores produz múltiplas frequências naturais de operação e modifica significativamente a resposta de transmissão do dispositivo.

Comparando-se os resultados desta análise com aqueles obtidos para uma única célula Matryoshka, apresentados na Seção 4.2, verifica-se um aumento expressivo da capacidade de rejeição do filtro. Enquanto os níveis máximos de rejeição observados anteriormente situavam-se próximos de 22 dB, a configuração composta por duas células Matryoshka atingiu aproximadamente 59 dB de atenuação. Esse resultado evidencia o papel do acoplamento eletromagnético entre os ressonadores na intensificação do mecanismo de rejeição e no aumento da seletividade espectral do dispositivo.

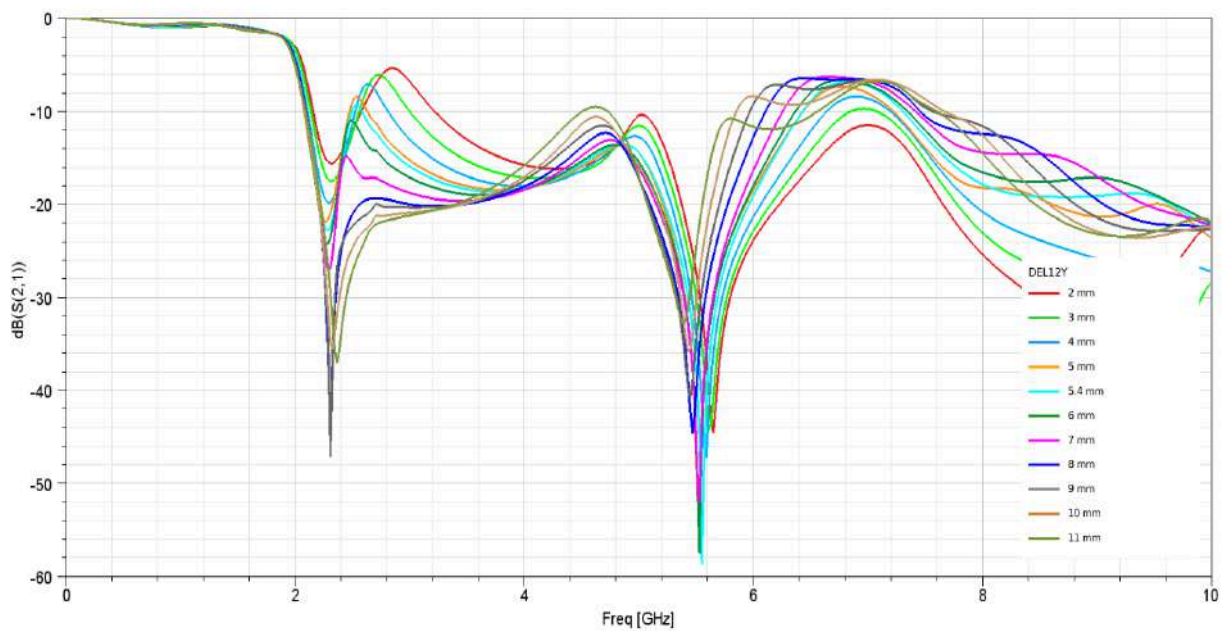
Dessa forma, conclui-se que a utilização simultânea de duas células Matryoshka representa uma estratégia eficaz para ampliar o desempenho de estruturas DGS aplicadas a filtros planares. Além de proporcionar bandas de rejeição mais profundas, essa configuração introduz maior flexibilidade no controle das frequências rejeitadas, permitindo respostas espectrais mais complexas e potencialmente mais adequadas a aplicações em sistemas de micro-ondas e comunicações sem fio. Em função do desempenho apresentado pela configuração com dimensões de 14 mm, essa condição foi adotada como referência para a análise do efeito do espaçamento entre as células DGS, apresentada na seção seguinte.

4.4 Influência do Espaçamento entre as células DGS

Após a identificação da configuração mais promissora na análise da utilização de duas células Matryoshka, foi realizada uma investigação adicional com o objetivo de avaliar a influência do espaçamento entre as estruturas DGS. Para isso, as dimensões das duas células foram mantidas constantes em $WMA11X = WMA21X = 14$ mm, enquanto o parâmetro DEL12Y, ilustrado na figura 19, responsável pela distância entre as células, foi variado de 2 mm a 11 mm.

A resposta em frequência obtida para os diferentes valores de espaçamento é apresentada na Figura 25.

Figura 25 - Resposta em frequência do filtro para diferentes valores do espaçamento entre as células Matryoshka (DEL12Y).



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Observa-se que a variação de DEL12Y provocou modificações significativas na profundidade das bandas rejeitadas, embora tenha produzido deslocamentos relativamente pequenos nas frequências centrais de rejeição.

Os resultados quantitativos são apresentados na Tabela 9. Verifica-se que a principal banda de rejeição permaneceu concentrada na região de aproximadamente 5,5 GHz durante praticamente toda a análise paramétrica, apresentando variações inferiores a 5% em

frequência. Comportamento semelhante foi observado para a banda localizada próxima de 2,3 GHz, indicando que o espaçamento entre as células exerce influência limitada sobre as frequências ressonantes da estrutura.

Tabela 9 - Frequências de rejeição e níveis de atenuação obtidos para diferentes valores de DEL12Y.

DEL12Y (mm)	1ª Frequência de Rejeição (GHz)	S21 (dB)	2ª Frequência de Rejeição (GHz)	S21 (dB)
2,0	5,65	-44,47	9,11	-35,00
3,0	5,61	-44,11	9,59	-38,97
4,0	5,59	-47,21	9,43	-26,65
5,0	5,53	-51,49	2,27	-21,87
5,4	5,55	-58,65	2,29	-22,84
6,0	5,53	-57,49	2,29	-24,24
7,0	5,53	-52,01	2,29	-27,05
8,0	5,47	-44,62	2,31	-44,37
9,0	2,31	-47,05	5,45	-40,68
10,0	5,43	-35,79	2,33	-35,54
11,0	2,37	-37,06	5,39	-32,87

Fonte: Elaborado pela Autora (2026).

Entretanto, ao analisar os níveis de atenuação, observa-se uma variação significativa da profundidade das bandas rejeitadas. O melhor desempenho foi obtido para DEL12Y = 5,4 mm, correspondente à geometria originalmente proposta no artigo de referência, alcançando uma rejeição de aproximadamente -58,65 dB em 5,55 GHz. Resultado semelhante foi obtido para DEL12Y = 6 mm, com rejeição de -57,49 dB, evidenciando a existência de uma faixa de espaçamento associada à máxima interação entre as células Matryoshka.

Comparando-se esse resultado com a configuração correspondente a DEL12Y = 10 mm, que apresentou rejeição de aproximadamente -35,79 dB, observa-se um ganho superior a 22 dB na profundidade da banda rejeitada. Esse resultado demonstra a elevada sensibilidade

da resposta do filtro ao espaçamento entre as células e evidencia a importância desse parâmetro no processo de otimização da estrutura.

Fisicamente, esse comportamento pode ser explicado pela interação entre os campos eletromagnéticos gerados pelas estruturas ressonantes. Quando as células encontram-se excessivamente próximas, ocorre um acoplamento intenso que altera a distribuição de corrente e reduz a eficiência da rejeição. Por outro lado, quando a distância entre elas se torna muito elevada, a interação eletromagnética enfraquece, reduzindo a contribuição conjunta dos ressonadores para a formação das bandas rejeitadas. Dessa forma, existe uma região intermediária de espaçamento capaz de maximizar o desempenho da estrutura.

Observa-se ainda que, para alguns valores de DEL12Y, ocorre uma inversão entre os bandas de rejeição dominantes identificadas na resposta em frequência, fazendo com que diferentes bandas de rejeição passem a apresentar os maiores níveis de atenuação. Esse comportamento reforça a influência do acoplamento entre as células sobre a distribuição dos modos ressonantes do sistema e evidencia a complexidade espectral introduzida pela interação entre os ressonadores.

Comparando-se os resultados desta seção com aqueles apresentados na Seção 4.3, verifica-se uma diferença importante no papel desempenhado pelos parâmetros analisados. Enquanto a variação das dimensões das células Matryoshka promoveu deslocamentos expressivos das frequências de rejeição, a alteração do espaçamento atuou predominantemente sobre a intensidade da rejeição, mantendo praticamente inalteradas as frequências centrais de operação.

Os resultados obtidos demonstram que o parâmetro DEL12Y atua principalmente como um mecanismo de ajuste do acoplamento eletromagnético entre as células DGS, permitindo otimizar a intensidade das bandas rejeitadas sem alterar significativamente sua posição espectral. Além disso, a proximidade entre o melhor resultado encontrado e a geometria originalmente proposta indica que o espaçamento adotado no trabalho de referência já se encontrava próximo da condição ótima de funcionamento da estrutura. Tal resultado demonstra que o desempenho do filtro depende não apenas das dimensões dos ressonadores, mas também do grau de interação eletromagnética estabelecido entre eles, tornando o espaçamento entre as células um parâmetro fundamental para a otimização da seletividade do dispositivo.

4.5 Discussão Consolidada dos Resultados

As análises paramétricas realizadas ao longo deste capítulo permitiram identificar de forma clara a influência dos principais parâmetros geométricos sobre a resposta eletromagnética do filtro estudado. Os resultados obtidos evidenciam que cada elemento da estrutura exerce uma função específica no comportamento espectral do dispositivo, atuando de maneira complementar na definição das frequências de rejeição, da profundidade das bandas rejeitadas e do nível de acoplamento eletromagnético entre os ressonadores.

Inicialmente, a análise do comprimento do stub demonstrou que esse parâmetro exerce influência predominante sobre o posicionamento das frequências de rejeição. Verificou-se que o aumento de seu comprimento promove o deslocamento dos notches para frequências menores, comportamento associado ao aumento do comprimento elétrico efetivo da estrutura. Além disso, observou-se que a profundidade das bandas rejeitadas permaneceu relativamente constante ao longo das configurações avaliadas, indicando que o principal efeito do stub está relacionado ao reposicionamento espectral das bandas de rejeição.

De forma semelhante, a análise da estrutura Matryoshka com uma única célula DGS evidenciou que as dimensões dos anéis ressonantes também atuam diretamente sobre as frequências rejeitadas. O aumento simultâneo dos parâmetros WMA1A e WMA2A resultou no deslocamento controlado das duas bandas de rejeição identificadas no filtro, confirmando a elevada sensibilidade da estrutura às suas dimensões geométricas. Entretanto, assim como observado para o stub, as variações na profundidade das bandas rejeitadas foram relativamente pequenas quando comparadas aos deslocamentos obtidos nas frequências de ressonância.

Por outro lado, a introdução de uma segunda célula Matryoshka produziu alterações mais significativas na resposta do filtro. Além do surgimento de múltiplos modos ressonantes distribuídos ao longo do espectro, verificou-se um aumento expressivo da profundidade das bandas rejeitadas, com níveis de atenuação superiores aos observados na configuração contendo apenas uma célula. Esse comportamento evidencia a contribuição do acoplamento eletromagnético entre os ressonadores para a intensificação do mecanismo de rejeição e para o aumento da seletividade espectral da estrutura.

Complementarmente, a análise do espaçamento entre as células Matryoshka demonstrou que o parâmetro DEL12Y exerce influência distinta das demais variáveis estudadas. Enquanto as dimensões dos ressonadores mostraram-se responsáveis principalmente pelo posicionamento das frequências rejeitadas, o espaçamento atuou predominantemente sobre a intensidade da rejeição obtida. Os resultados indicaram a existência de uma faixa ótima de separação entre as células, capaz de maximizar o acoplamento eletromagnético e produzir maiores níveis de atenuação sem provocar alterações significativas nas frequências centrais de operação.

A partir da comparação conjunta dos resultados, observa-se que os parâmetros analisados podem ser agrupados de acordo com suas funções no processo de projeto do filtro. O comprimento do stub e as dimensões das estruturas Matryoshka atuam principalmente como mecanismos de sintonia das frequências rejeitadas, permitindo o reposicionamento espectral das bandas de rejeição. Em contrapartida, a utilização de duas células DGS e o ajuste do espaçamento entre elas estão diretamente relacionados ao fortalecimento do mecanismo de rejeição, influenciando a profundidade das bandas rejeitadas por meio do controle do acoplamento eletromagnético entre os ressonadores.

Os resultados obtidos neste trabalho mostram-se consistentes com aqueles reportados na literatura para filtros planares baseados em estruturas DGS. Estudos como os de Mariano (2017), Santos (2023), Costa (2024) e Carvalho et al. (2025) demonstram que a geometria Matryoshka pode ser empregada no desenvolvimento de filtros compactos com elevada seletividade e ampla capacidade de controle da resposta em frequência por meio da variação de parâmetros geométricos. Os resultados obtidos neste trabalho corroboram essas observações, uma vez que as modificações realizadas nas dimensões dos elementos ressonantes produziram deslocamentos significativos das frequências de rejeição e alterações relevantes nos níveis de atenuação observados.

Além disso, a utilização simultânea de duas células Matryoshka resultou em níveis de rejeição superiores aos observados na configuração contendo apenas uma célula, atingindo aproximadamente $-58,65$ dB. Esse comportamento está em concordância com trabalhos que exploram o acoplamento entre estruturas ressonantes para aumentar a seletividade e a profundidade das bandas rejeitadas. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam o potencial das estruturas DGS do tipo Matryoshka para aplicações em filtros passa-baixas de

micro-ondas, contribuindo para a compreensão da influência dos parâmetros geométricos sobre o desempenho desses dispositivos e fornecendo informações relevantes para futuras etapas de projeto e otimização de filtros baseados em estruturas DGS do tipo Matryoshka.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que o desempenho do filtro não depende de um único parâmetro geométrico, mas da interação conjunta entre elementos responsáveis pela sintonia espectral e elementos responsáveis pelo controle do acoplamento eletromagnético. Tal compreensão permite não apenas explicar o comportamento observado nas simulações realizadas, mas também fornece subsídios para futuras etapas de otimização da estrutura, visando ao desenvolvimento de filtros com características de rejeição adequadas a diferentes aplicações em sistemas de micro-ondas e telecomunicações.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar a influência dos parâmetros geométricos de um filtro passa-baixa em tecnologia microfita, composto por stubs e estruturas DGS do tipo Matryoshka, sobre sua resposta em frequência, por meio de simulações eletromagnéticas realizadas no software ANSYS HFSS. Para isso, foi inicialmente realizada uma revisão bibliográfica acerca dos conceitos fundamentais relacionados a filtros em micro-ondas, tecnologia microfita, parâmetros de espalhamento, stubs e estruturas Defected Ground Structure (DGS), fornecendo a base teórica necessária para a compreensão dos fenômenos investigados.

A partir da reprodução da geometria proposta no trabalho de referência e da validação de seu comportamento eletromagnético, foram conduzidas análises paramétricas com o objetivo de investigar o efeito dos principais parâmetros geométricos sobre a resposta do filtro. Os resultados obtidos permitiram compreender de forma detalhada os mecanismos responsáveis pela formação das bandas de rejeição e pelo desempenho espectral da estrutura.

A análise do comprimento do stub demonstrou que esse parâmetro exerce influência predominante sobre o posicionamento das frequências de rejeição, atuando como um importante mecanismo de sintonia espectral. Verificou-se que o aumento do comprimento elétrico do stub promove o deslocamento das bandas rejeitadas para frequências mais baixas, mantendo níveis de rejeição relativamente estáveis ao longo das configurações avaliadas.

Em relação à estrutura Matryoshka, observou-se que as dimensões dos anéis ressonantes influenciam diretamente as frequências de rejeição do filtro, permitindo o reposicionamento controlado das bandas rejeitadas sem a necessidade de alterações significativas na geometria global da estrutura. Os resultados evidenciaram a elevada sensibilidade da resposta em frequência às dimensões dos ressonadores, confirmando o potencial da geometria Matryoshka como mecanismo de ajuste espectral.

A utilização simultânea de duas células Matryoshka resultou em alterações mais expressivas na resposta do filtro, promovendo o surgimento de múltiplos modos ressonantes e níveis de rejeição significativamente superiores aos observados na configuração com uma única célula. Tal comportamento evidenciou a importância do acoplamento eletromagnético

entre os ressonadores para a intensificação das bandas rejeitadas e para o aumento da seletividade da estrutura.

Adicionalmente, a análise do espaçamento entre as células demonstrou que o parâmetro DEL12Y atua predominantemente sobre a intensidade da rejeição obtida, influenciando o grau de acoplamento eletromagnético estabelecido entre os ressonadores. Os resultados indicaram a existência de uma região de operação ótima, capaz de maximizar a profundidade das bandas rejeitadas sem provocar alterações significativas nas frequências centrais de operação.

De forma geral, os resultados obtidos permitiram identificar a função desempenhada por cada parâmetro geométrico no comportamento do filtro. Verificou-se que o stub e as dimensões das estruturas Matryoshka atuam principalmente no controle das frequências rejeitadas, enquanto a utilização de múltiplas células DGS e o ajuste do espaçamento entre elas estão diretamente relacionados ao fortalecimento do mecanismo de rejeição por meio do controle do acoplamento eletromagnético.


Dessa forma, conclui-se que o objetivo geral deste trabalho foi plenamente alcançado, assim como os objetivos específicos propostos. As análises realizadas permitiram compreender a influência dos parâmetros geométricos mais relevantes sobre a resposta em frequência do filtro, fornecendo subsídios para futuras etapas de projeto e otimização de estruturas DGS aplicadas a sistemas de micro-ondas e telecomunicações.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se a realização de estudos envolvendo a otimização simultânea dos parâmetros geométricos analisados, bem como a fabricação e caracterização experimental da estrutura proposta, permitindo a comparação entre os resultados simulados e medidos. Além disso, a investigação de novas configurações de células DGS e de diferentes estratégias de acoplamento entre ressonadores pode contribuir para o desenvolvimento de filtros com desempenho ainda mais adequado às demandas dos sistemas modernos de comunicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANSYS, Inc. Ansys HFSS, versão 2024 R1. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>. Acesso em: 12 maio 2025.
- [2] CARVALHO, Gleidson Jose Ataide de et al. *A compact microstrip lowpass filter with wide rejection band and sharp roll-off*. In: IEEE CONFERENCE, 2025. Anais [...]. 2025. p. 1–4.
- [3] COSTA, José André da. *Desenvolvimento de filtros passa-faixa planares baseados na geometria matrioska com três camadas de metalização*. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/bitstream/177683/4063/3/Jos%C3%A9%20Andr%C3%A9-3-55.pdf>. Acesso em: 19 maio 2026.
- [4] MARIANO, J. G. de O. *Implementação de Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Federal da Paraíba (IFPB), João Pessoa, PB, Brasil, 2017.
- [5] INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA. *Simulação Ansys HFSS: guia de onda retangular*. João Pessoa: IFPB, 2024.
- [6] INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA (IFPB). SIC – Serviço de Informação ao Cidadão. João Pessoa: IFPB, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ifpb.edu.br/sic/institucional>. Acesso em: 25 Março 2026.
- [7] GOMES NETO, Alfrêdo. *Micro-ondas: filtros – teoria*. Campina Grande: Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado – GTEMA, 2024. Material didático.
- [8] GOMES NETO, Alfrêdo. *Micro-ondas: expressões para o cálculo da constante dielétrica efetiva, largura efetiva e impedância característica*. Campina Grande: Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado – GTEMA, 2013. Material didático.
- [9] MALORATSKY, Leo G. Reviewing the basics of microstrip lines. *Microwaves & RF*, v. 39, n. 3, p. 79–88, mar. 2000.
- [10] ELECTRONICS TUTORIALS. Band Stop Filter. Disponível em: <https://www.electronics-tutorials.ws/filter/band-stop-filter.html>. Acesso em: 1 abr. 2026.
- [11] POZAR, David M. *Microwave engineering*. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012
- [12] D'ASSUNÇÃO JÚNIOR, Adaildo Gomes. *Parâmetros S*. Material didático da disciplina Estruturas Guiantes e Dispositivos de Micro-ondas. João Pessoa: Instituto Federal da Paraíba, 2024.

- [13] HONG, Jia-Sheng G.; LANCASTER, Michael J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [14] LACANETTE, K. *A Basic Introduction to Filters– Active, Passive and Switched Capacitor*. [S.l.], 1991. 22 p.
- [15] OUF, A. E.; EL-HAMEED, A. A. A.; ABDALLAH, E. A. F. Defected Ground Structure Based on Matryoshka Geometry for Microwave Filter Applications. *IEEE Access*, v. 12, p. 1-12, 2024.
- [16] GOMES NETO, Alfredo; SILVA, Jefferson Costa e; COUTINHO, Ianes Barbosa Grécia; CAMILO FILHO, Saulo Souto; SANTOS, Danila Araújo; ALBUQUERQUE, Bruno Lima Cavalcanti de. A defected ground structure based on matryoshka geometry. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 21, n. 2, p. 284-293, 2022. DOI: 10.1590/2179-10742022v21i2256115. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2179-10742022v21i2256115>>. Acesso em: 13 maio 2026.
- [17] SANTOS, Danila Araújo. *Filtros DGSs baseados na geometria matryoshka*. 2023. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.
- [18] RODRIGUES, Waléska Faustino. *Análise numérica de um filtro passa-baixas compacto com larga banda de rejeição*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2025.

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

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC final com documentação exigida.

Assunto:	TCC final com documentação exigida.
Assinado por:	Maria Thereza
Tipo do Documento:	Tese
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Maria Thereza Gomes do Nascimento Roque, DISCENTE (20231610002) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 25/06/2026 12:25:03.

Este documento foi armazenado no SUAP em 25/06/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1896460

Código de Autenticação: d4f1d96c26

