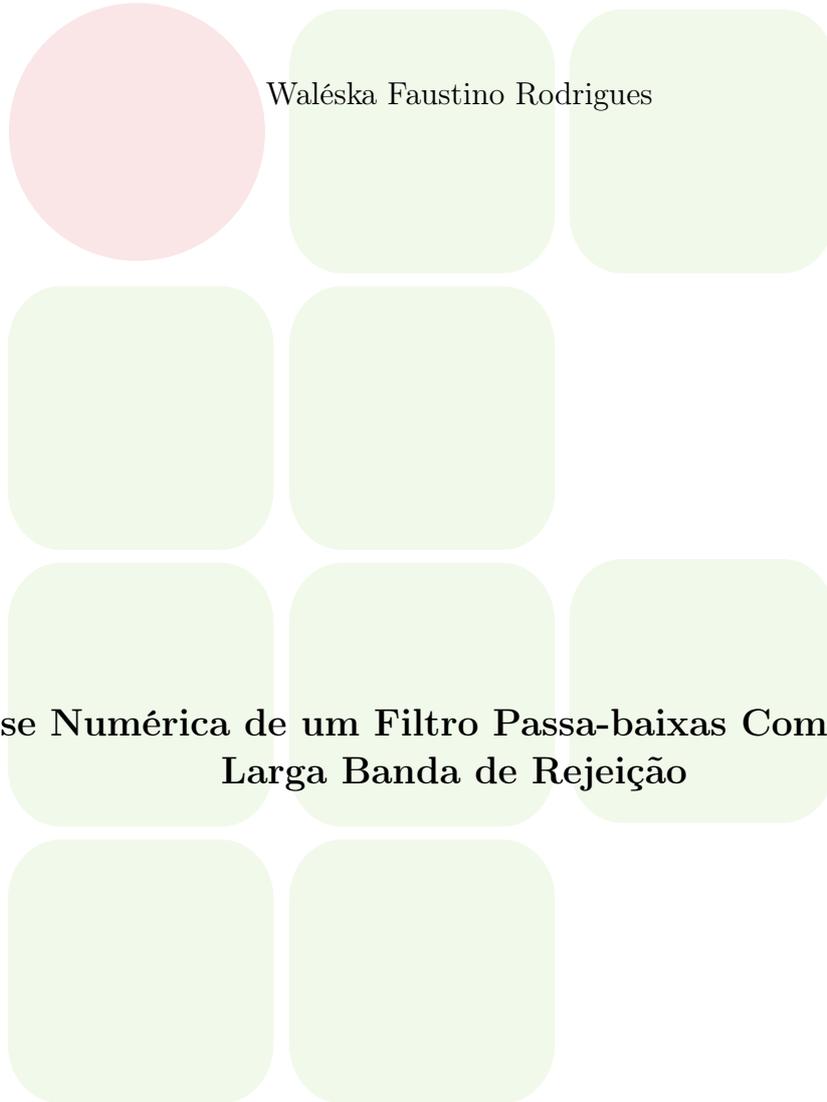


INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



Waléska Faustino Rodrigues

**Análise Numérica de um Filtro Passa-baixas Compacto com  
Larga Banda de Rejeição**

João Pessoa  
2025

Waléska Faustino Rodrigues

## **Análise Numérica de um Filtro Passa-baixas Compacto com Larga Banda de Rejeição**

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

**Orientador: Alfredo Gomes Neto, Dr.**

**João Pessoa  
2025**

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

R696a Rodrigues, Waléska Faustino.

Análise numérica de um filtro passa-baixas compacto com larga banda de rejeição / Waléska Faustino Rodrigues. - 2025. 52 f. : il.

TCC (Graduação – Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025. Orientação: Profº. Dr. Alfredo Gomes Neto.

1.Filtro passa-baixa. 2. DGS. 3. Matrioska. 4. Banda de rejeição. I. Título

CDU 621.372.852.1(043)



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

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**WALÉSKA FAUSTINO RODRIGUES**

**20201610032**

### **"Análise Numérica de um Filtro Passa-baixas Compacto com Larga Banda de Rejeição"**

Trabalho de Conclusão de Curso, TCC, submetido à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

TCC aprovado pela banca examinadora em 13 de agosto de 2025.

#### **BANCA EXAMINADORA:**

*(assinaturas eletrônicas via SUAP)*

**Dr. Alfredo Gomes Neto**

IFPB (Orientador)

**Dr. Gustavo Araujo Cavalcante**

IFPB (Examinador Interno)

**Dr. Jefferson Costa e Silva**

IFPB (Examinador Interno)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Alfredo Gomes Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/08/2025 09:23:15.
- **Jefferson Costa e Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/08/2025 09:24:06.
- **Gustavo Araujo Cavalcante**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/08/2025 09:58:16.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 14/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 749267

Verificador: 84df07849e

Código de Autenticação:



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

## Agradecimentos

A Deus, por me conceder força, coragem e resiliência. Por nunca permitir que eu desistisse e por estar sempre ao meu lado, iluminando meus caminhos e abençoando cada etapa dessa jornada.

À minha família, em especial aos meus pais, que nunca mediram esforços para que este sonho se tornasse realidade. Vocês foram minha base, meu alicerce e minha força nos dias mais difíceis. Obrigada por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidava da minha própria capacidade.

Aos meus amigos, minha sincera gratidão por cada palavra de incentivo e apoio. Em especial, aos amigos da faculdade, com quem dividi essa trajetória. Sem vocês, essa fase da minha vida certamente não teria sido a mesma.

Agradeço, ainda, pela oportunidade de participar dos grupos de pesquisa GPDS e GTEMA, onde pude ampliar meus conhecimentos, desenvolver habilidades e compartilhar experiências que contribuíram significativamente para minha formação acadêmica e pessoal.

Aos professores do Instituto Federal da Paraíba – IFPB, Campus João Pessoa, agradeço pela dedicação, pelos ensinamentos compartilhados e pelo conhecimento transmitido ao longo do curso.

Em especial, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto, pela orientação atenta, pelas cobranças construtivas e por toda a paciência durante a elaboração deste trabalho. Também estendo meu agradecimento à banca avaliadora, composta pelos professores Dr. Jefferson Costa e Silva e Dr. Gustavo Araújo Cavalcante, pelas contribuições valiosas.

## RESUMO

Neste trabalho, é realizado um estudo sobre filtros passa-baixa com larga banda de rejeição, utilizando estruturas com modificação no plano de terra, baseadas na geometria Matrioska. O objetivo é aprimorar o desempenho do filtro em termos de atenuação e seletividade, com ênfase na faixa de rejeição. As análises foram conduzidas por meio de simulações eletromagnéticas utilizando o software Ansys HFSS, permitindo avaliar o impacto de diferentes parâmetros geométricos na resposta em frequência do filtro. Além disso, foram aplicadas técnicas de otimização visando ao desenvolvimento de uma estrutura mais compacta e eficiente, capaz de atender às exigências de sistemas que requerem ampla rejeição de frequências indesejadas.

**Palavras-chave:** Filtro passa-baixa, DGS, Matrioska, Banda de rejeição.

## ABSTRACT

In this work, a study is carried out on low-pass filters with a wide rejection band, using structures with modifications to the ground plane, based on the Matrioska geometry. The aim is to improve the filter's performance in terms of attenuation and selectivity, with an emphasis on the rejection band. The analyses were conducted by means of electromagnetic simulations using Ansys HFSS software, allowing the impact of different geometric parameters on the filter's frequency response to be assessed. In addition, optimization techniques were applied with a view to developing a more compact and efficient structure, capable of meeting the demands of systems that require extensive rejection of unwanted frequencies.

***Keywords:*** *Low-pass filter, DGS, Matrioska, Rejection band.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da telecomunicação. . . . .	14
Figura 2 – Resposta dos filtros em função da frequência. . . . .	18
Figura 3 – Resposta do filtro passa-baixa. . . . .	19
Figura 4 – Resposta em frequência do filtro passa-baixas tipo descontinuidade em grau. . . . .	20
Figura 5 – Resposta em frequência do filtro passa-baixas com larga faixa de rejeição. . . . .	20
Figura 6 – Dimensões da linha de microfita. . . . .	21
Figura 7 – Distribuição do campo elétrico na seção transversal da microfita. . . . .	21
Figura 8 – Diferentes formas da estrutura DGS, (a) haltere, (b) formato de H, (c) formato de E, (d) H com H invertido, e (e) E consecutivo. . . . .	22
Figura 9 – Geometria Matrioska com 4 anéis concêntricos. . . . .	23
Figura 10 – Geometria Matrioska com 2 anéis concêntricos. . . . .	23
Figura 11 – Fluxograma com as fases da elaboração do projeto. . . . .	26
Figura 12 – Definição de parâmetros para análise. . . . .	27
Figura 13 – Filtro proposto. . . . .	27
Figura 14 – Especificação das variáveis. . . . .	28
Figura 15 – Resposta em frequência do filtro 1. . . . .	30
Figura 16 – Resposta em frequência do filtro 1 com a variação do WM1. . . . .	30
Figura 17 – Resposta em frequência do filtro 1 com a variação do WM2. . . . .	31
Figura 18 – Resposta em frequência do filtro 1 com a variação do WMA1. . . . .	33
Figura 19 – Resposta em frequência do filtro 1 com a variação do WMA2. . . . .	34
Figura 20 – Resposta em frequência do filtro 1 com a variação do d. . . . .	35
Figura 21 – Resposta em frequência do filtro 2. . . . .	35
Figura 22 – Resposta em frequência do filtro 2 com a variação do WM1. . . . .	36
Figura 23 – Resposta em frequência do filtro 2 com a variação do WM2. . . . .	37
Figura 24 – Resposta em frequência do filtro 2 com a variação do WMA1. . . . .	38
Figura 25 – Resposta em frequência do filtro 2 com a variação do WMA2. . . . .	40
Figura 26 – Resposta em frequência do filtro 2 com a variação do d. . . . .	41
Figura 27 – Resposta em frequência do filtro 3. . . . .	42
Figura 28 – Resposta em frequência do filtro 3 com a variação do WM1. . . . .	43
Figura 29 – Resposta em frequência do filtro 3 com a variação do WM2. . . . .	44
Figura 30 – Resposta em frequência do filtro 3 com a variação do WMA1. . . . .	45
Figura 31 – Resposta em frequência do filtro 3 com a variação do WMA2. . . . .	46
Figura 32 – Resposta em frequência do filtro 3 com a variação do d. . . . .	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores iniciais atribuídos às variáveis. . . . .	29
--	----

## Lista de abreviaturas e siglas

1G	<i>Primeira Geração de Redes Móveis</i>
4G	<i>Quarta Geração de Redes Móveis</i>
5G	<i>Quinta Geração de Redes Móveis</i>
dB	<i>Decibel</i>
DGS	<i>Defected Ground Structure, Estrutura com Defeito no Plano de Terra</i>
FSS	<i>Frequency Selective Surfaces, Superfície Seletiva em Frequência</i>
GHz	<i>Gigahertz</i>
GTEMA	<i>Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator, Simulador de Estruturas de Alta Frequência</i>
IFPB	<i>Instituto Federal da Paraíba</i>
IoT	<i>Internet of Things, Internet das Coisas</i>
LPF	<i>Low-Pass Filter, Filtro Passa-Baixa</i>
mm	<i>Milímetro</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board, Placa de Circuito Impresso</i>
PBG	<i>Photonic Band-Gap, Lacuna de Banda Fotônica</i>
TEM	<i>Transverse Electromagnetic Mode, Modo Eletromagnético Transversal</i>

## Lista de símbolos

$W$	<i>Largura</i>
$t$	<i>Espessura da camada de metalização</i>
$h$	<i>Espessura do substrato dielétrico</i>
$\epsilon_r$	<i>Constante dielétrica relativa</i>
$f_a$	<i>Frequência de atenuação</i>
$f_c$	<i>Frequência de corte</i>
$f_{res}$	<i>Frequência de ressonância</i>
$L_{eff}$	<i>Comprimento efetivo</i>
$\epsilon_{reff}$	<i>Constante dielétrica efetiva</i>
$WXAM1$	<i>Largura do anel externo (anel 1) na direção <math>x</math></i>
$WYAM1$	<i>Largura do anel externo (anel 1) na direção <math>y</math></i>
$WXAM2$	<i>Largura do anel externo (anel 2) na direção <math>x</math></i>
$WYAM2$	<i>Largura do anel externo (anel 2) na direção <math>y</math></i>
$WMA1$	<i>Largura do anel externo (anel 1) da geometria Matrioska 1</i>
$WMA2$	<i>Largura do anel externo (anel 1) da geometria Matrioska 2</i>
$WM1$	<i>Gap, fenda da geometria de Matrioska 1</i>
$WM2$	<i>Gap, fenda da geometria de Matrioska 2</i>
$d$	<i>Distância entre as geometrias Matrioska 1 e 2</i>
$S_{21}$	<i>Coefficiente de transmissão</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos . . . . .	15
1.1.1	Objetivo geral . . . . .	15
1.1.2	Objetivo específicos . . . . .	15
1.2	Estrutura do texto . . . . .	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>17</b>
2.1	Filtros . . . . .	17
2.1.1	Filtro passa-baixa . . . . .	18
2.1.2	Filtro passa-baixa com larga banda de rejeição . . . . .	19
2.2	Linhas de microfita . . . . .	21
2.3	Estrutura DGS . . . . .	22
2.4	Geometria Matrioska . . . . .	23
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>25</b>
3.1	Software implementado . . . . .	25
3.2	Fase da elaboração do projeto . . . . .	25
3.3	Parâmetros adotados . . . . .	26
3.4	Análise do modelo e design . . . . .	27
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>29</b>
4.1	Análise do filtro 1 . . . . .	29
4.1.1	Análise da variação do WM1 . . . . .	29
4.1.2	Análise da variação do WM2 . . . . .	31
4.1.3	Análise da variação do WMA1 . . . . .	32
4.1.4	Análise da variação do WMA2 . . . . .	33
4.1.5	Análise da variação do d . . . . .	34
4.2	Análise do filtro 2 . . . . .	34
4.2.1	Análise da variação do WM1 . . . . .	36
4.2.2	Análise da variação do WM2 . . . . .	37
4.2.3	Análise da variação do WMA1 . . . . .	38
4.2.4	Análise da variação do WMA2 . . . . .	39
4.2.5	Análise da variação do d . . . . .	40
4.3	Análise do filtro 3 . . . . .	41
4.3.1	Análise da variação do WM1 . . . . .	42
4.3.2	Análise da variação do WM2 . . . . .	43

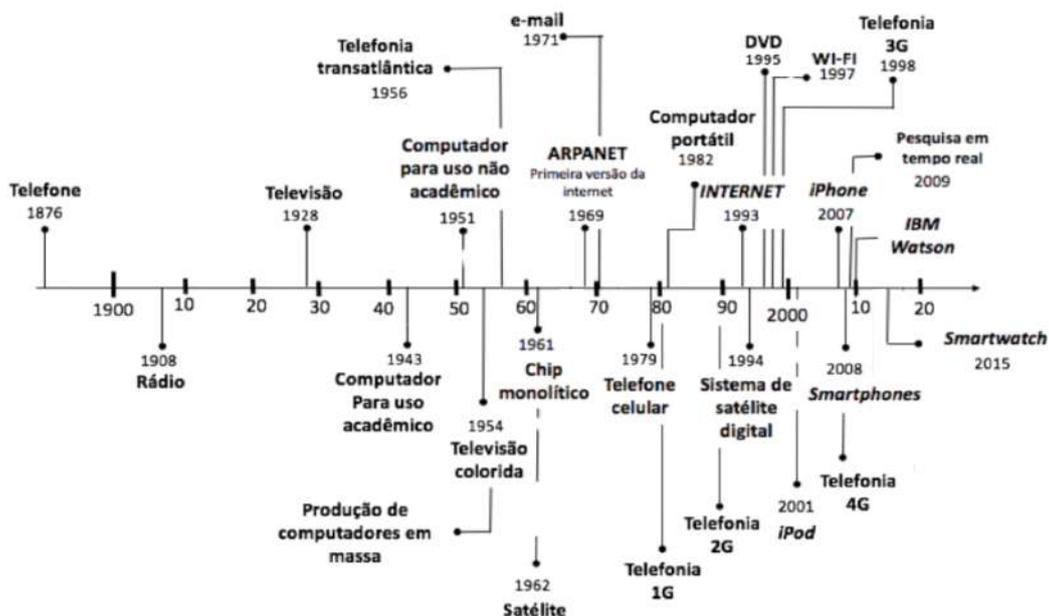
4.3.3	Análise da variação do WMA1 . . . . .	44
4.3.4	Análise da variação do WMA2 . . . . .	45
4.3.5	Análise da variação do d . . . . .	47
5	CONCLUSÃO . . . . .	49
5.1	Considerações finais . . . . .	49
5.2	Propostas de trabalhos futuros . . . . .	50
	REFERÊNCIAS . . . . .	51

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, observa-se uma significativa evolução na área de telecomunicações. O telégrafo foi uma das primeiras formas de comunicação à distância por meio de equipamentos elétricos, operando com pulsos elétricos que transmitiam mensagens codificadas em sinais, permitindo a transmissão de uma única mensagem por vez (RIBEIRO, 2024). Com os avanços tecnológicos, chegamos à quinta geração de redes móveis (5G), que proporciona velocidades de transmissão significativamente mais altas, menor latência, maior eficiência espectral e elevada confiabilidade. Essa tecnologia amplia a capacidade de conexão simultânea de dispositivos, viabilizando o desenvolvimento da Internet das Coisas (IoT) e aplicações em tempo real (ANATEL, 2025).

A Figura 1 ilustra a evolução das telecomunicações ao longo das décadas, destacando marcos tecnológicos como o telefone (1876), o rádio (1908), a televisão (1928) e o avanço da telefonia móvel, desde o 1G (1979) até o 4G (2008). Essa linha do tempo demonstra o impacto das inovações na conectividade global e no desenvolvimento de novas aplicações tecnológicas (RIBEIRO, 2019).

**Figura 1** – Evolução da telecomunicação.



Fonte: Adaptada de (RIBEIRO, 2019).

Os filtros são componentes essenciais em sistemas de telecomunicações, responsáveis por selecionar, atenuar ou eliminar determinadas faixas de frequência. Sua evolução acompanha os avanços na área, desempenhando um papel crucial tanto nos processos de transmissão quanto de recepção de sinais, garantindo a integridade, a qualidade e a eficiência na comunicação.

A comunicação sem fio evoluiu significativamente nos últimos anos, impondo requisitos cada vez mais rigorosos para o projeto de filtros. Esses dispositivos precisam apresentar alto desempenho, combinado a custos reduzidos, facilidade de fabricação e dimensões cada vez menores. Além disso, a rejeição de respostas espúrias torna-se uma exigência cada vez mais crítica para garantir a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de comunicação atuais (OUF; EL-HAMEED; ABDALLAH, 2024).

O filtro passa-baixa (LPF; do inglês, *low-pass filter*) tem apresentado uma demanda crescente em aplicações de banda larga, onde é utilizado para suprimir sinais indesejados, evitar interferências entre sistemas, melhorar o desempenho geral e aumentar a eficiência de radiação das antenas. Recentemente, os LPFs mais buscados são aqueles que combinam um *roll-off* acentuado (transição rápida entre as bandas de passagem e rejeição), correspondência de impedância precisa e uma ampla largura de banda, atendendo às exigências dos sistemas de comunicação modernos (OUF; EL-HAMEED; ABDALLAH, 2024). A ampla largura de banda, nesse contexto, refere-se a uma faixa de rejeição extensa e contínua, na qual não ocorrem novas ressonâncias indesejadas.

Uma das técnicas utilizadas para atender às especificações dos filtros é a remoção de uma parte do plano de terra dos circuitos de microfita, técnica essa conhecida pela estrutura com defeito no plano de terra (DGS; do inglês, *Defected Ground Structure*). O Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA) do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) tem se dedicado ao desenvolvimento de pesquisas sobre dispositivos com novas formas geométricas, entre os quais se destacam filtros planares baseados na geometria Matrioska, que se inspira nas tradicionais bonecas russas (NETO, 2020; NETO et al., 2022; COSTA, 2024; SANTOS, 2023).

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o desempenho de um filtro passa-baixa com estrutura DGS baseado na geometria Matrioska, visando à obtenção de uma ampla banda de rejeição e rápida transição da banda passante para a banda de rejeição.

### 1.1.2 Objetivo específicos

- ✓ Realizar uma revisão bibliográfica sobre filtros passa-baixa;
- ✓ Compreender as características do filtro DGS e da geometria Matrioska, analisando suas vantagens, limitações e impacto na resposta em frequência;
- ✓ Projetar e otimizar um filtro passa-baixa compacto com ampla banda de rejeição, considerando critérios de desempenho como atenuação e resposta transitória;

- ✓ Caracterizar numericamente o filtro projetado, empregando simulações eletromagnéticas;
- ✓ Comparar e analisar criticamente os resultados obtidos, identificando a configuração que melhor atende aos requisitos especificados para a aplicação desejada;
- ✓ Redigir e apresentar o Trabalho de Conclusão de Curso.

## 1.2 Estrutura do texto

No capítulo 2, são abordados os conceitos fundamentais relacionados aos filtros, com ênfase nos filtros passa-baixa. Além disso, são detalhadas as características das linhas de microfita, da estrutura DGS e da geometria Matrioska, estabelecendo a base teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 3, é apresentada a metodologia adotada para a elaboração deste trabalho. Já no Capítulo 4, são apresentados os resultados das análises realizadas sobre os filtros projetados, com foco na obtenção de uma larga banda de rejeição. São discutidas, ainda, as variações paramétricas aplicadas durante o processo de otimização, visando aprimorar o desempenho do dispositivo.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados deste trabalho, bem como propostas de melhorias e sugestões para desenvolvimentos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os conceitos fundamentais em relação ao desenvolvimento deste trabalho. A compreensão teórica é indispensável para analisar os princípios físicos e matemáticos que regem os dispositivos e técnicas empregadas.

### 2.1 Filtros

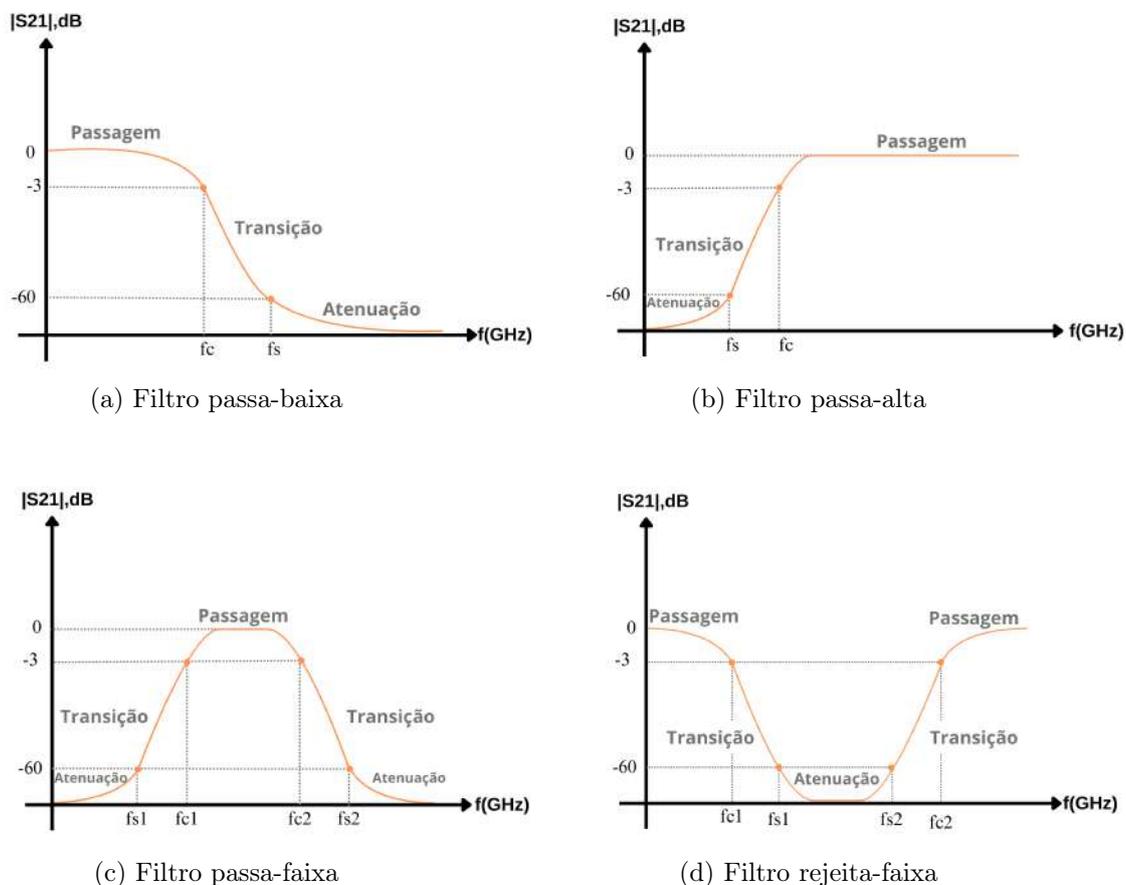
Os filtros têm uma função essencial para o funcionamento dos sistemas de telecomunicações, sendo responsáveis pela seleção e discriminação de frequências em um sinal. Sua principal função é permitir a passagem de componentes espectrais desejados enquanto atenuam ou rejeitam aqueles indesejados. Essa capacidade de manipulação do espectro é essencial para moldar o conteúdo de frequência de sinais em sistemas de comunicação, sistemas de radar e instrumentação de radiofrequência (HONG; LANCASTER, 2004). Por meio dos filtros, é possível controlar com precisão as faixas de frequência transmitidas ou suprimidas, garantindo a integridade do sinal e a minimização de interferências.

Os filtros baseados em ressonadores, que utilizam estruturas de linhas de microfitas e configurações similares, como linhas coplanares e acopladas, são amplamente utilizados em sistemas de telecomunicações devido às suas vantagens em termos de fabricação e integração. Embora esses filtros apresentem algumas desvantagens, como perdas de inserção relativamente altas e um fator de qualidade inferior quando comparados a filtros em guia de ondas ou ressonadores dielétricos, sua popularidade se deve principalmente à facilidade de fabricação, à diversidade de aplicações possíveis e à capacidade de integração direta com circuitos ativos (HONG; LANCASTER, 2004).

A classificação dos filtros é feita com base em sua resposta em frequência, ou seja, na forma como eles permitem ou bloqueiam diferentes faixas de frequência. Assim, os filtros podem ser classificados em quatro tipos principais: passa-baixas, passa-altas, rejeita-faixa e passa-faixa.

A Figura 2 mostra a resposta em frequência típica dos principais tipos de filtro. Observa-se que o filtro passa-baixa permite a passagem de frequências abaixo de um valor de corte, enquanto o filtro passa-alta permite a passagem de frequências acima de um valor de corte. O filtro rejeita-faixa bloqueia uma faixa específica de frequências e permite a passagem das frequências fora dessa faixa. Já o filtro passa-faixa permite a passagem de frequências dentro de uma faixa específica e atenua as frequências fora dessa faixa.

Figura 2 – Resposta dos filtros em função da frequência.



Fonte: Autoria própria.

### 2.1.1 Filtro passa-baixa

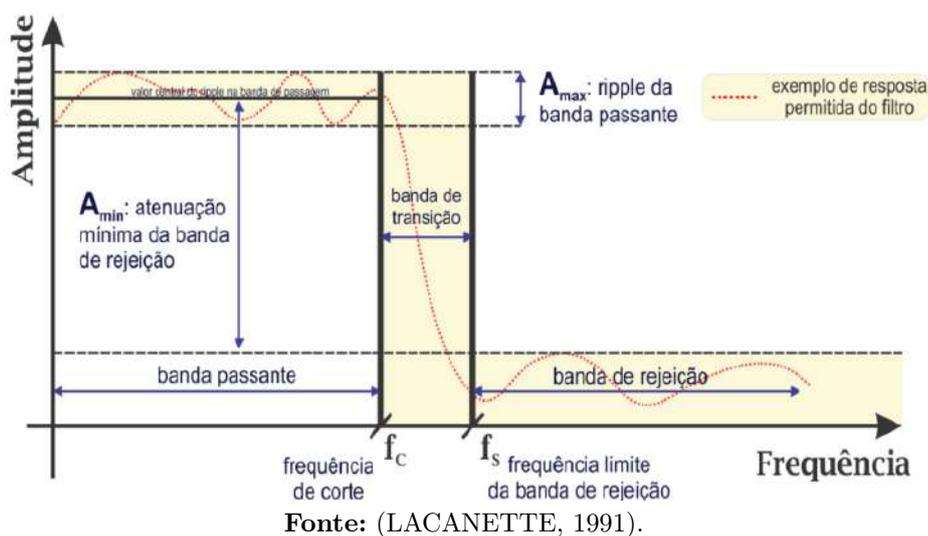
O filtro escolhido para a realização deste trabalho foi o passa-baixa, onde sua principal característica é a transmissão de sinais cuja frequência esteja abaixo de um valor específico, conhecido como frequência de corte ( $f_c$ ), enquanto componentes de frequência superiores a esse limite são progressivamente atenuados.

A frequência de corte é o ponto na resposta em frequência no qual a potência do sinal de saída se reduz para 50% do seu valor máximo. Em termos logarítmicos, esse valor equivale a -3 dB em relação ao nível de referência (HONG; LANCASTER, 2004; COSTA, 2024). Esse parâmetro define o limite da largura de banda efetiva do dispositivo, caracterizando a região em que o sistema mantém uma resposta aceitável antes que a atenuação se torne significativa, de acordo com os requisitos da aplicação. Em termos de tensão do sinal, uma redução de 3 dB na potência de saída corresponde a aproximadamente 70,7% da tensão máxima de saída. Além disso, a frequência de rejeição é um parâmetro essencial em sistemas de filtragem e amplificação de sinais, pois indica a capacidade do dispositivo de atenuar ou eliminar sinais indesejados dentro de uma faixa específica de frequência (LACANETTE, 1991; COSTA, 2024).

Além da frequência de corte e da frequência de rejeição, outros parâmetros são essenciais na análise de filtros, que influenciam diretamente a qualidade e seletividade do circuito. Entre eles, destacam-se a largura de banda, faixas de passagem e de rejeição, faixa de transição, atenuação, perda de retorno e perda de inserção.

A Figura 3 ilustra os diferentes tipos de bandas na resposta em frequência de um filtro passa-baixa, que incluem a banda passante, a banda de transição e a banda de rejeição. Neste estudo, destaca-se a largura da banda de rejeição, responsável por definir a faixa de frequências na qual o filtro apresenta uma atenuação significativa. Isso significa que, além da frequência de corte, o filtro continua rejeitando sinais em uma ampla região do espectro de frequências, garantindo uma supressão eficaz de interferências e ruídos.

**Figura 3** – Resposta do filtro passa-baixa.



### 2.1.2 Filtro passa-baixa com larga banda de rejeição

Os LPFs têm sido amplamente empregados em aplicações de banda larga devido à sua capacidade de suprimir sinais indesejados, minimizar a interferência com outros sistemas, otimizar o desempenho eletromagnético geral e aprimorar a eficiência de radiação de elementos radiantes, como antenas (OUF; EL-HAMEED; ABDALLAH, 2024). A larga banda de rejeição tem como objetivo maximizar a atenuação das frequências indesejadas em uma faixa ampla além da frequência de corte.

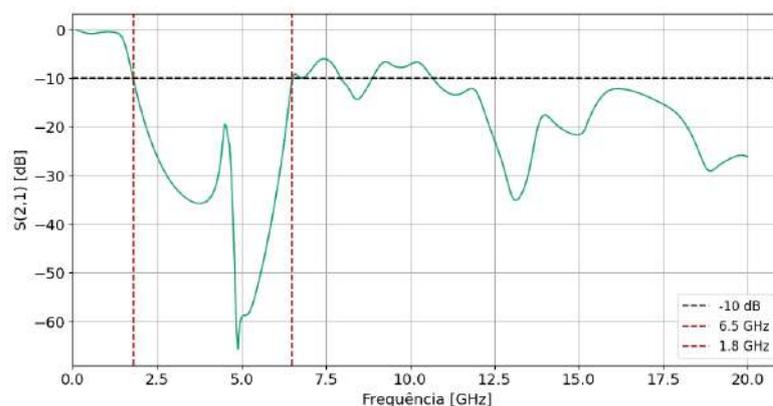
Na seção 2.1.1, foi abordada a resposta típica de um filtro passa-baixa e os principais parâmetros utilizados em sua análise. É importante destacar que essa resposta não considera as limitações práticas inerentes à implementação física do dispositivo, como perdas e a ocorrência de frequências de ressonâncias indesejadas.

Na prática, a resposta em frequência de um filtro real exibe uma atenuação progressiva fora da banda passante. Além disso, desajustes de impedância podem provocar reflexões indesejadas no sistema, comprometendo o desempenho. O uso de ressonadores

também impõe restrições à largura da banda de rejeição, o que pode limitar a eficiência do filtro em certas aplicações.

A Figura 4 apresenta a resposta em frequência de um filtro passa-baixas, em microfita, tipo descontinuidade em degrau. Considerando uma atenuação mínima de  $|S_{21}|$  igual a 10 dB, observa-se que o filtro pode operar de forma aceitável até aproximadamente  $f_{\text{máxima}} \approx 6,5$  GHz, o que representa cerca de 3,6 vezes a frequência em que se atinge uma atenuação de 10 dB, estimada em  $f_{\text{atenuação}} \approx 1,8$  GHz.

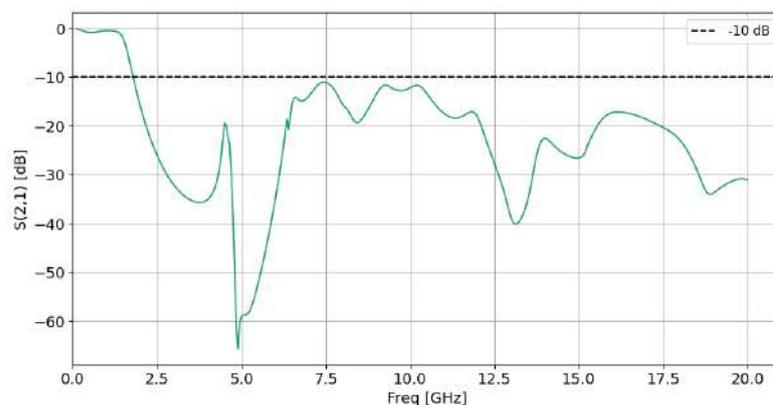
**Figura 4** – Resposta em frequência do filtro passa-baixas tipo descontinuidade em degrau.



**Fonte:** Autoria própria.

A caracterização de um filtro com larga banda de rejeição é feita por meio da razão entre a frequência máxima de operação e a frequência de início da atenuação, a qual deve ser significativamente elevada ou, idealmente, tendendo ao infinito para garantir uma rejeição efetiva em uma ampla faixa de frequências. Dessa forma, após atingir a faixa de rejeição, o valor de  $|S_{21}|$  do filtro se mantém abaixo do limite estabelecido ao longo de uma ampla faixa de frequências, conforme ilustrado na Figura 5.

**Figura 5** – Resposta em frequência do filtro passa-baixas com larga faixa de rejeição.



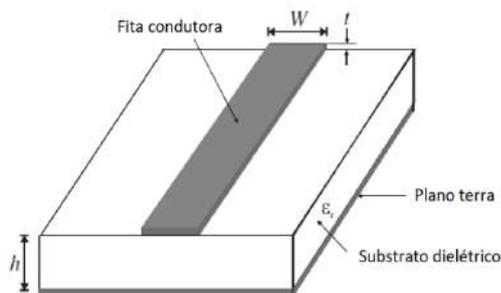
**Fonte:** Autoria própria.

## 2.2 Linhas de microfita

As linhas de microfita são um exemplo de linhas de transmissão utilizadas em circuitos de radiofrequência e micro-ondas. Sua popularidade deve-se à facilidade de fabricação, ao baixo custo e à compatibilidade com a tecnologia de placa de circuitos impressos (PCB; do inglês, *Printed Circuit Board*).

A estrutura de uma linha de microfita consiste em uma fita condutora, conhecida como linha de microfita, caracterizada por sua largura  $W$  e espessura  $t$ , posicionada sobre um substrato dielétrico de espessura  $h$  e constante dielétrica relativa  $\epsilon_r$ . A parte inferior do substrato é composta por um plano de terra condutor, que atua como referência elétrica para a transmissão de sinais, conforme mostrado na Figura 6 (HONG; LANCASTER, 2004).

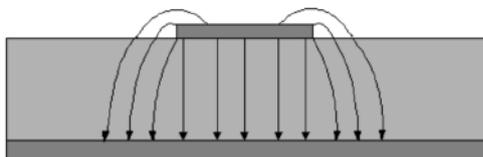
**Figura 6** – Dimensões da linha de microfita.



**Fonte:** Adaptada de (HONG; LANCASTER, 2004).

Em uma linha de microfita, os campos eletromagnéticos se propagam simultaneamente em dois meios distintos: o ar, acima da estrutura, e entre a fita e o plano terra, no substrato dielétrico. Devido a essa configuração não homogênea, a microfita não suporta a propagação de uma onda de modo transversal eletromagnético (TEM ; do inglês, *Transverse Electromagnetic Mode*), pois esse modo de propagação possui exclusivamente componentes transversais e sua velocidade depende apenas das propriedades do material, como a permissividade e a permeabilidade. Entretanto, o modo dominante dessa linha de transmissão é denominado Quase-TEM, o que indica que sua propagação é semelhante à de uma onda TEM, mas não corresponde exatamente a esse tipo de onda (HONG; LANCASTER, 2004). Na microfita, os campos elétrico e magnético atravessam a interface entre o dielétrico e o espaço livre (ar), resultando em uma distribuição de campo distinta, de acordo com a Figura 7.

**Figura 7** – Distribuição do campo elétrico na seção transversal da microfita.



**Fonte:** (BOZZI et al., 2003)

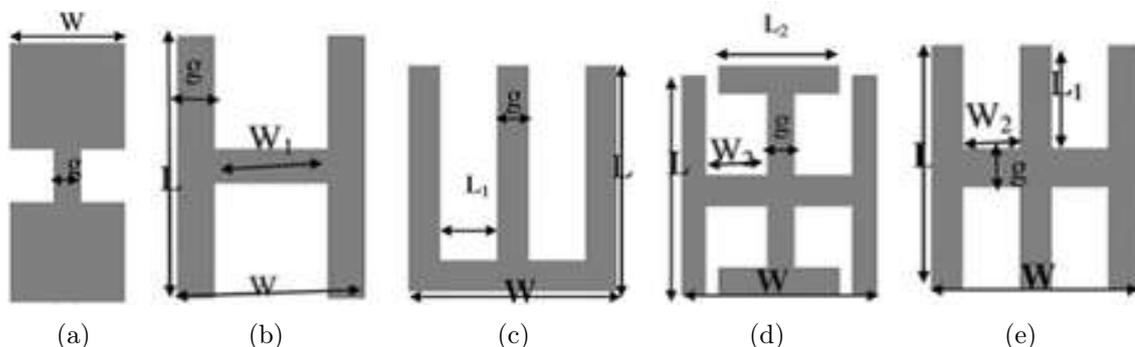
### 2.3 Estrutura DGS

As estruturas DGSs são formadas pela remoção seletiva de uma determinada geometria no plano de terra de linhas de transmissão planares. A introdução intencional dessas discontinuidades no plano de terra provoca perturbações significativas na distribuição da corrente de superfície, alterando as características eletromagnéticas da estrutura. Como consequência, a impedância equivalente da linha de transmissão é modificada, influenciando o desempenho do circuito em termos de acoplamento, filtragem e resposta em frequência (KUMAR; SHARAWI; PANDEY, 2021).

Essas estruturas possuem como principal característica o efeito de onda lenta, originado pelos componentes equivalentes de indutância e capacitância, o que contribui para a miniaturização dos componentes e para a rejeição seletiva de determinadas faixas de frequência, caracterizando os efeitos de banda de rejeição (GARG; KAUR, 2014). Um fator de onda lenta mais elevado implica um aumento do comprimento elétrico para um mesmo comprimento físico, melhorando a resposta da banda passante em filtros de microfita. Além disso, a estrutura DGS se destaca por sua elevada seletividade na frequência de corte e por proporcionar uma ampla banda de rejeição isenta de espúrios (BOHRA; PRAJAPATI, 2020).

O DGS pode ser utilizado no projeto de filtros passa-baixa compactos, proporcionando elevada atenuação fora da banda passante (OUF; EL-HAMEED; ABDALLAH, 2024). A resposta em frequência e o desempenho do filtro são diretamente influenciados pela geometria adotada no DGS. Dessa forma, existem diferentes configurações de DGS, cada uma com propriedades eletromagnéticas específicas, conforme ilustrado na Figura 8.

**Figura 8** – Diferentes formas da estrutura DGS, (a) haltere, (b) formato de H, (c) formato de E, (d) H com H invertido, e (e) E consecutivo.



**Fonte:** (ELSHEAKH et al., 2010).

O DGS apresenta vantagens em relação às estruturas PBG (do inglês, *Photonic Band-Gap*), sendo mais fácil de projetar e implementar, além de oferecer maior precisão quando aplicado a padrões regulares de defeitos (GARG; KAUR, 2014). Devido a essas características, sua aplicação prática em circuitos de micro-ondas torna-se altamente rele-

vante. Além disso, o DGS se mostra mais competitivo que o PBG em cenários que exigem elevada miniaturização em determinadas condições operacionais.

## 2.4 Geometria Matrioska

A geometria Matrioska representa uma abordagem de uma forma geométrica para a fabricação e caracterização de filtros em microfita. Essa configuração é baseada em anéis concêntricos, mas, diferentemente dos anéis concêntricos usuais, na geometria Matrioska os anéis são interligados, aumentando o seu comprimento elétrico equivalente, sem aumentar o seu comprimento físico (NETO et al., 2024). A estrutura da geometria pode ser visualizada na Figura 9.

**Figura 9** – Geometria Matrioska com 4 anéis concêntricos.



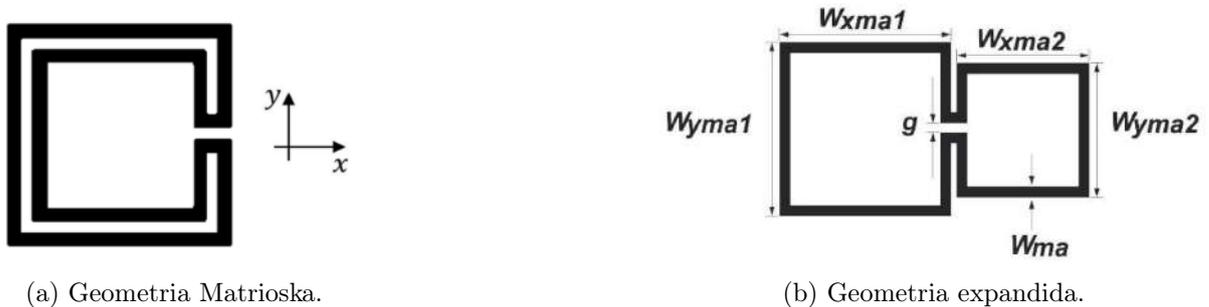
(a) Geometria Matrioska.

(b) Geometria expandida.

**Fonte:** Adaptada de (MARIANO, 2017).

Embora seja possível considerar configurações com mais de dois anéis concêntricos, neste trabalho optou-se por utilizar apenas dois anéis concêntricos, conforme ilustrado na Figura 10.

**Figura 10** – Geometria Matrioska com 2 anéis concêntricos.



(a) Geometria Matrioska.

(b) Geometria expandida.

**Fonte:** Adaptada de (MARIANO, 2017).

A obtenção de uma resposta específica em frequência pode ser controlada por meio da modificação de parâmetros como as dimensões dos anéis concêntricos, a quantidade de anéis, o espaçamento entre eles e a posição do gap, que corresponde à fenda inserida no anel externo. Essas variações permitem ajustes no desempenho do filtro sem alterar a área ocupada pelo anel mais externo (COSTA, 2024). A obtenção da geometria Matrioska é

descrita em (MARIANO, 2017; NETO et al., 2022). Recentemente, também foi publicada uma revisão que descreve as diversas aplicações da geometria Matrioska em diferentes contextos, incluindo filtros, antenas, sensores e superfícies seletivas em frequência (FSS; do inglês *Frequency Selective Surface*) (NETO et al., 2024).

As equações (1)-(3) são consideradas as equações iniciais do projeto, servindo como ponto de partida para o dimensionamento da geometria. Para a simplificação das equações, foram adotadas as seguintes definições:  $W_{xma1} = W_{yma1} = W_{ma1}$  e  $W_{xma2} = W_{yma2} = W_{ma2}$ . Dessa forma, a frequência de ressonância é definida por:

$$f_{\text{res}}(\text{GHz}) = \frac{0.3}{L_{\text{eff}}\sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}}, \quad (1)$$

sendo,

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

e,

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

Onde  $L_{\text{eff}}$  representa o comprimento efetivo. Enquanto  $\varepsilon_{\text{reff}}$  corresponde à permissividade elétrica relativa para a linha de microfita.

Para a estrutura composta por dois anéis Matrioska, três anéis concêntricos, a Equação 1 permanece válida. No entanto, o comprimento efetivo ( $L_{\text{eff}}$ ) é calculado por:

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

## 3 METODOLOGIA

Nesta seção, apresenta-se a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho, abrangendo as ferramentas computacionais utilizadas na implementação e a definição dos parâmetros empregados nas simulações.

### 3.1 Software implementado

Para a realização das análises deste trabalho, foi utilizado o software Ansys HFSS (do inglês, *High Frequency Structure Simulator*) na versão Student 2024 R2.

O HFSS é uma ferramenta de simulação eletromagnética voltada para aplicações em altas frequências, amplamente utilizada no projeto e análise de dispositivos de radio-frequência e micro-ondas. O software permite a obtenção de diversos parâmetros elétricos da estrutura simulada, como os parâmetros S, Y e Z. Além disso, possibilita a visualização dos campos eletromagnéticos, a distribuição de corrente sobre a superfície condutora, o perfil de impedância e a geração de diagramas de radiação, fornecendo uma análise completa do comportamento do dispositivo em estudo (Ansys Inc., 2024).

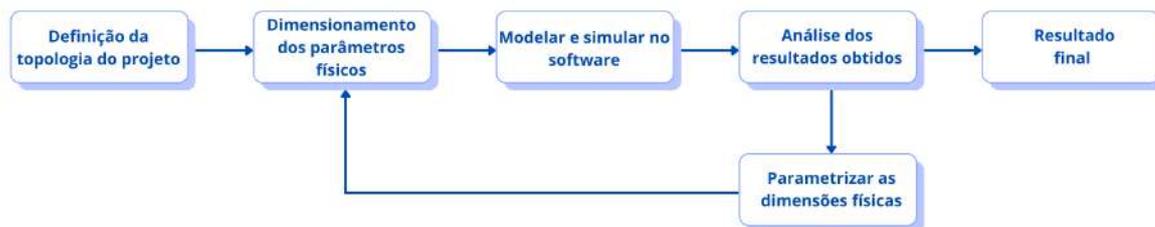
O parâmetro S foi utilizado para ser analisado, pois ele representa o coeficiente de transmissão, isto é, a fração do sinal incidente na porta de entrada que é transmitida até a porta de saída do filtro. Esse fator é fundamental para avaliar o desempenho do projeto, uma vez que indica a eficiência na passagem do sinal pela faixa de frequência desejada.

Outra plataforma utilizada no desenvolvimento deste trabalho foi o Google Colab, empregada para a geração de gráficos com maior nível de detalhamento e apresentação visual aprimorada. A ferramenta possibilitou a manipulação e visualização eficientes dos dados simulados, contribuindo para uma análise mais clara e precisa dos resultados (Google, 2023).

### 3.2 Fase da elaboração do projeto

Para a elaboração deste projeto, foi considerada exclusivamente a análise numérica do filtro. Nesse contexto, foi realizado um planejamento estruturado para guiar o desenvolvimento das etapas do projeto, conforme ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 11.

Inicialmente, a primeira etapa do desenvolvimento consistiu na definição da topologia do projeto. Nessa fase, foi estabelecido o objetivo principal do trabalho: o desenvolvimento de um filtro do tipo passa-baixa com larga banda de rejeição. Para isso, foram analisadas topologias comumente utilizadas na literatura por meio de uma revisão

**Figura 11** – Fluxograma com as fases da elaboração do projeto.

Fonte: Autoria própria.

bibliográfica. Com base nesse estudo, optou-se pela adoção da técnica de inserção de uma estrutura DGS, com o intuito de melhorar a atenuação na banda de rejeição e otimizar o desempenho do filtro. A estrutura escolhida para compor o filtro foi a geometria Matrioska, cuja descrição detalhada e princípios de funcionamento foram abordados na seção 2.4.

Em seguida, foi realizado o dimensionamento dos parâmetros físicos da estrutura, definindo-se o tamanho, a espessura e a distribuição geométrica. Após essa etapa, foram realizadas as simulações no software Ansys HFSS, permitindo a análise dos resultados obtidos. Nesse estudo, foram observadas características como a frequência de corte, o nível de atenuação e a largura da banda de rejeição. Caso os resultados não atendessem aos critérios estabelecidos para o projeto, procedia-se com a parametrização dos elementos físicos, ajustando-os iterativamente até alcançar um desempenho satisfatório conforme os requisitos especificados.

### 3.3 Parâmetros adotados

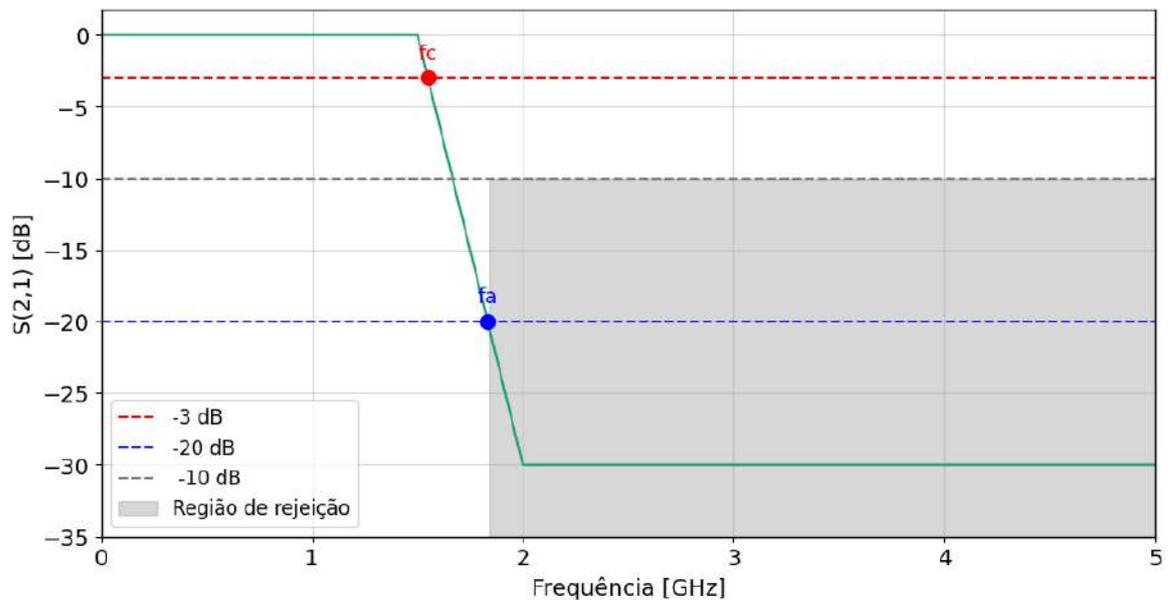
Durante o desenvolvimento deste trabalho, em todas as simulações foi considerado o uso do substrato FR-4, com espessura de 1,6 mm, constante dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) de 4,4 e tangente de perdas igual a 0,02. As portas de entrada e saída foram configuradas com impedância característica de 50  $\Omega$ , correspondente a uma largura de linha de microfita de 2,8 mm.

Para a validação do projeto, foram estabelecidos critérios de desempenho específicos, visando assegurar a eficácia do filtro proposto. A frequência de corte foi definida no ponto em que a atenuação atinge 3 dB, indicando o início da banda de transição entre a banda passante e a banda de rejeição. Por sua vez, a frequência correspondente à atenuação de 20 dB foi adotada como o limite superior da banda de transição, servindo como referência para caracterizar a efetividade da rejeição do filtro.

Considerou-se como banda de rejeição a faixa de frequências na qual o  $S_{21}$ (dB) permanece inferior a -10 dB, garantindo a supressão adequada dos sinais indesejados nessa região.

Na Figura 12, são ilustrados os critérios adotados para a análise do filtro, incluindo a definição da  $f_c$  e da frequência de atenuação ( $f_a$ ). Essas frequências foram determinadas a partir da interseção da curva de resposta com os níveis de atenuação de 3 dB e 20 dB, respectivamente. Além disso, é destacada a faixa de frequências considerada como região de rejeição.

**Figura 12** – Definição de parâmetros para análise.

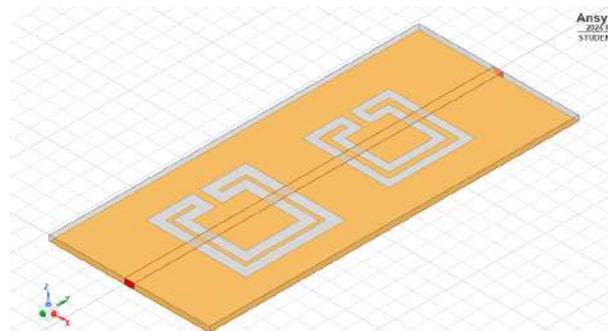


Fonte: Autoria própria.

### 3.4 Análise do modelo e design

Para a elaboração deste trabalho, foi adotado o modelo ilustrado na Figura 13. O filtro proposto é composto por duas geometrias Matrioska, posicionadas no plano de terra. Essas geometrias formam a estrutura DGS do filtro, sendo implementadas por meio da remoção seletiva de material no plano de terra.

**Figura 13** – Filtro proposto.



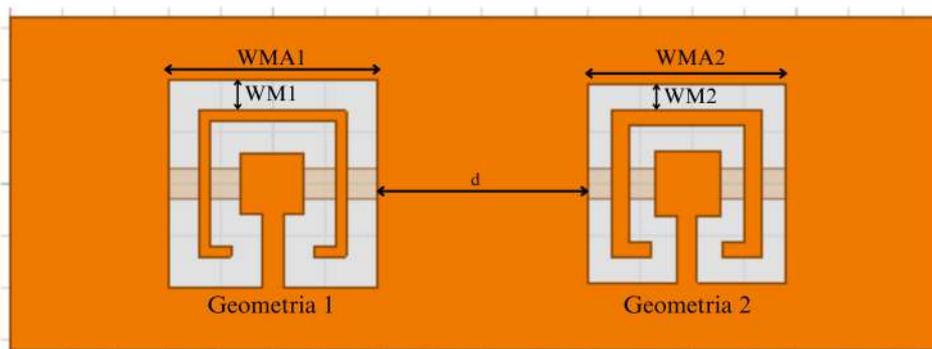
Fonte: Autoria própria.

Para alcançar um desempenho satisfatório, foram realizadas alterações no projeto, incluindo o tamanho, o posicionamento, espaçamento das geometrias Matrioska. Esses

ajustes têm como intuito otimizar a resposta do filtro, para atingir a frequência de corte desejada com uma larga banda de rejeição, de modo a atender aos critérios definidos para o projeto.

A Figura 14 ilustra as principais variáveis ajustadas durante o processo de otimização, destacando as dimensões que influenciam diretamente o desempenho do dispositivo.

**Figura 14** – Especificação das variáveis.



Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, possibilitando avaliar o comportamento do filtro. Esse estudo permite verificar o desempenho do filtro proposto, além de identificar eventuais ajustes necessários para alinhar e alcançar um resultado satisfatório.

Para isso, foram projetados três filtros com diferentes dimensões, cujas respostas em frequência, bem como os efeitos das variações dos parâmetros geométricos, são analisados nos Tópicos 4.1, 4.2 e 4.3, correspondentes, respectivamente, aos Filtros 1, 2 e 3. A Tabela 1 apresenta os valores iniciais adotados para cada configuração, servindo como referência para as análises subsequentes.

**Tabela 1** – Valores iniciais atribuídos às variáveis.

	WM1[mm]	WM2[mm]	WMA1[mm]	WMA2[mm]	d[mm]
Filtro 1	1	1,5	30	26	15
Filtro 2	1	1,5	20	25	5
Filtro 3	1	1,5	20	19	13

**Fonte:** Autoria própria.

### 4.1 Análise do filtro 1

Na Figura 15 é apresentada a resposta em frequência do parâmetro  $S_{21}$  para o filtro 1, expressa em escala logarítmica (dB), cobrindo a faixa de 0 a 5 GHz. Essa resposta foi obtida por meio de simulação, com o intuito de caracterizar o desempenho do filtro em termos de atenuação do sinal em função da frequência.

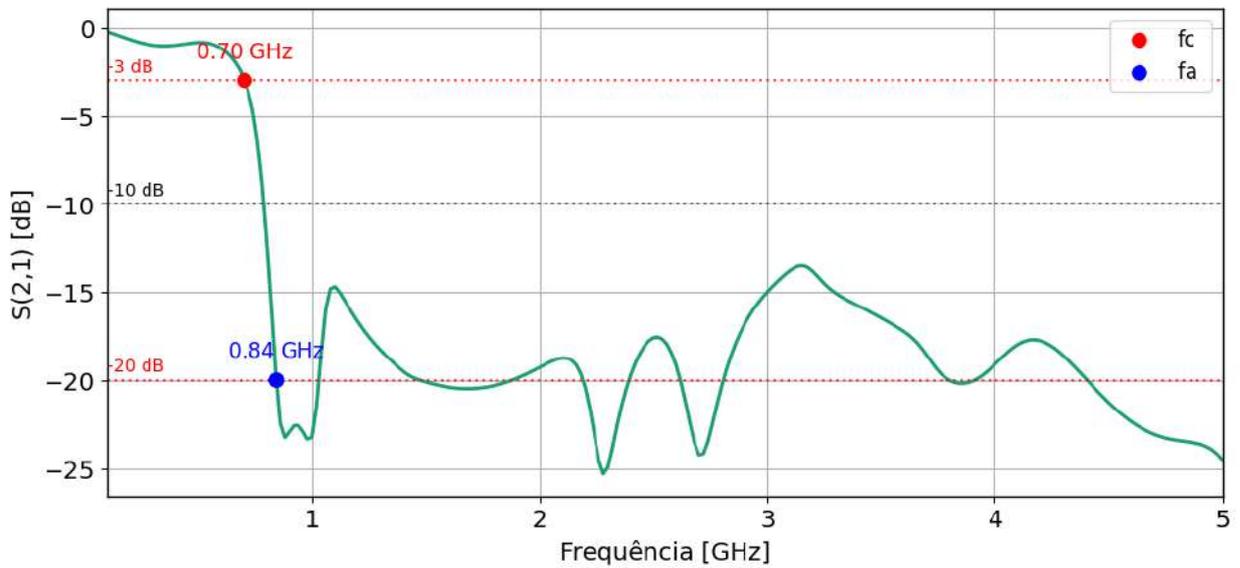
Ao analisar a resposta em frequência do filtro 1, fica claro que a transmissão do sinal na banda passante é eficiente para frequências inferiores a 0,7 GHz, com o parâmetro  $S_{21}$  se mantendo próximo de 0 dB. A partir dessa frequência até 0,84 GHz, identifica-se a região de transição, onde ocorre a passagem entre a banda passante e a banda de rejeição.

A banda de rejeição é definida a partir da frequência de 0,84 GHz, estendendo-se até 5 GHz. Esse comportamento caracteriza uma faixa de rejeição ampla. Dentro desse intervalo, a resposta do filtro apresenta variações de atenuação entre aproximadamente 15 dB e 25 dB, com pequenas variações ao longo da resposta em frequência, indicando uma boa uniformidade e eficácia na supressão de sinais indesejados.

#### 4.1.1 Análise da variação do WM1

Com o objetivo de compreender mais o comportamento do filtro, iniciou-se uma análise paramétrica detalhada da estrutura. A primeira variação realizada foi sobre o pa-

Figura 15 – Resposta em frequência do filtro 1.

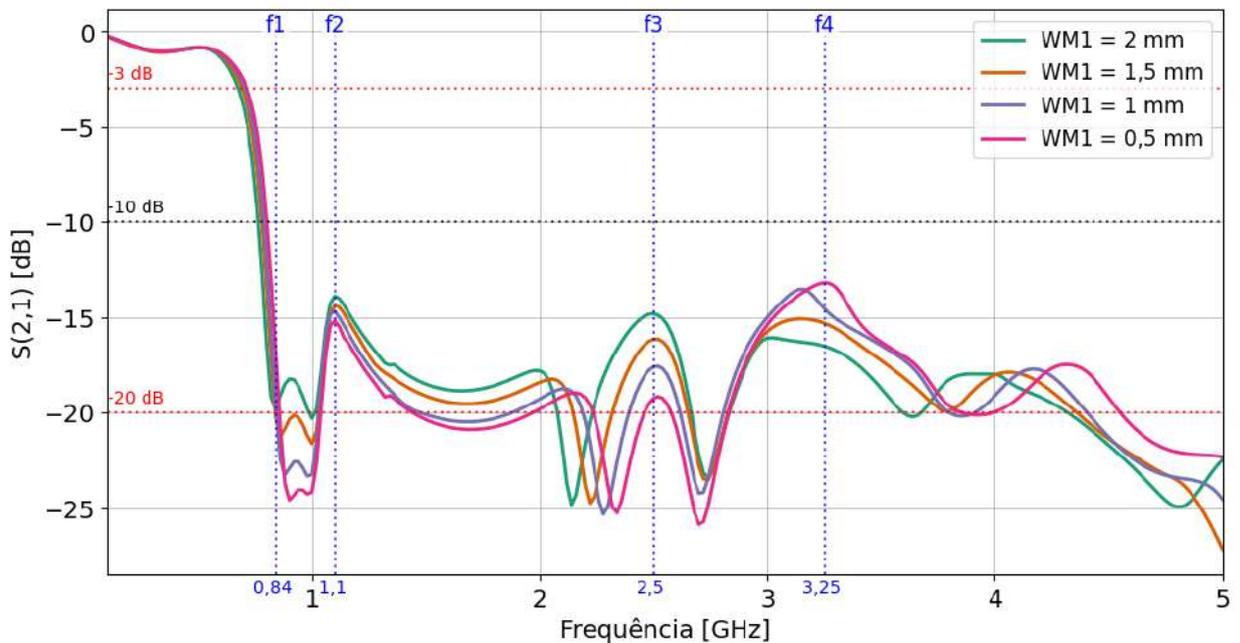


$WM1=1mm$ ;  $WM2=1,5mm$ ;  $WMA1=30mm$ ;  $WMA2=26mm$ ;  $d=15mm$ .

Fonte: Autoria própria.

râmetro  $WM1$  da DGS. Os valores considerados para essa análise foram:  $0,5mm$ ,  $1,0mm$ ,  $1,5mm$  e  $2,0mm$ , conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Resposta em frequência do filtro 1 com a variação do  $WM1$ .



$WM2=1,5mm$ ;  $WMA1=30mm$ ;  $WMA2=26mm$ ;  $d=15mm$ .

Fonte: Autoria própria.

Para essa resposta, percebe-se que, embora a variação não tenha alterado significativamente o comportamento geral do filtro, ela provoca mudanças sutis, porém relevantes, na profundidade da atenuação, na posição das ressonâncias e na largura da banda de re-

jeição.

A análise da atenuação nas frequências  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  e  $f_4$  evidencia que, para os casos de  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$ , o menor valor de atenuação ocorre quando o parâmetro  $WM1 = 2,0mm$ , enquanto o maior nível de atenuação é observado com  $WM1 = 0,5mm$ . Por exemplo, na frequência  $f_1$ , a atenuação varia de aproximadamente 19 dB com  $WM1 = 2,0mm$  até cerca de 24,5 dB com  $WM1 = 0,5mm$ . Tendência semelhante é observada nas frequências  $f_2$  e  $f_3$ : em  $f_2$ , os valores são de 14 dB para  $WM1 = 2,0mm$  e 15 dB para  $WM1 = 0,5mm$ ; em  $f_3$ , a atenuação é de 14,8 dB para  $WM1 = 2,0mm$  e 19 dB para  $WM1 = 0,5mm$ .

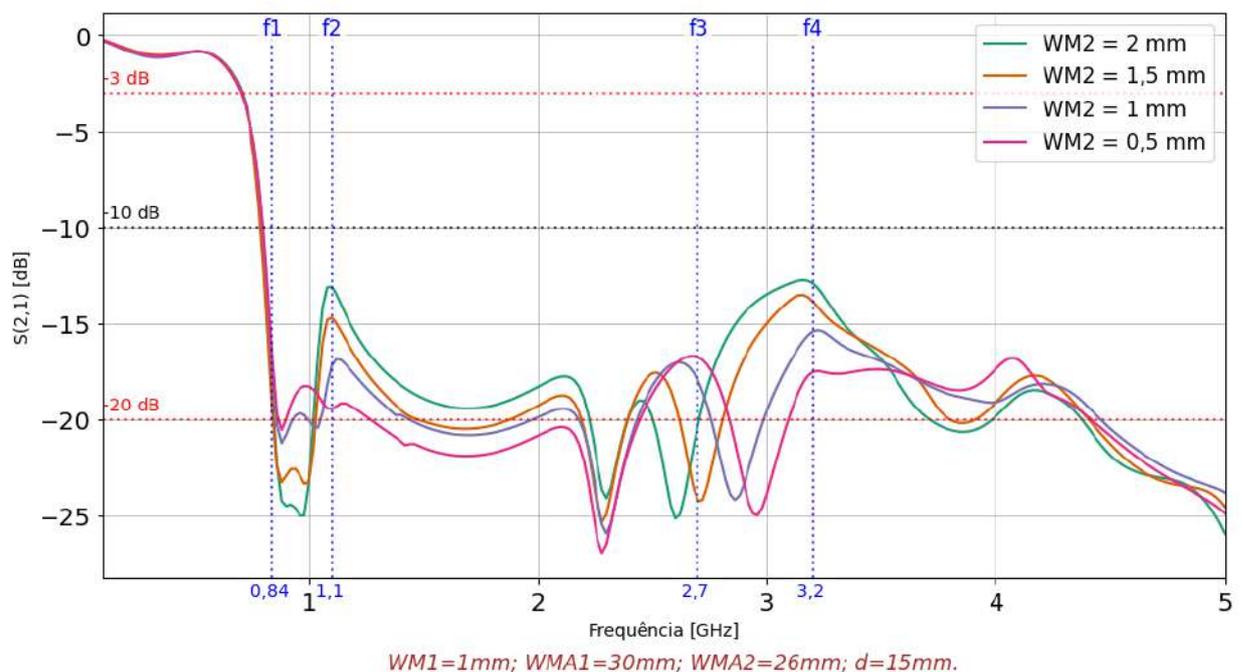
Contudo, essa tendência se inverte na frequência  $f_4$ , onde o menor valor de atenuação ocorre para  $WM1 = 0,5mm$  e o maior valor é registrada para  $WM1 = 2,0mm$ , evidenciando um comportamento não linear nesta faixa.

O aumento de  $WM1$  tende a suavizar a resposta do filtro, resultando em transições mais graduais e menores atenuações. Em contraste, a redução desse parâmetro acentua as ressonâncias e intensifica a rejeição, proporcionando uma resposta mais agressiva na banda indesejada.

#### 4.1.2 Análise da variação do $WM2$

Na sequência, foi realizada a variação do parâmetro  $WM2$ , utilizando os mesmos valores empregados na análise de  $WM1$ , cuja resposta em frequência está ilustrada na Figura 17.

**Figura 17** – Resposta em frequência do filtro 1 com a variação do  $WM2$ .



Fonte: Autoria própria.

Em relação à banda de transição, nota-se que tanto a frequência de corte quanto a frequência de atenuação permanecem inalteradas, indicando que as modificações realizadas não impactaram significativamente essa faixa de transição do filtro.

Na frequência  $f_1$ , é visto que a variação do parâmetro WM2 não provoca alterações significativas na frequência, porém afeta diretamente os níveis de atenuação. O menor valor de atenuação ocorre quando  $WM2 = 0,5mm$ , enquanto o maior valor de atenuação é observado com  $WM2 = 2mm$ . Por outro lado, nas frequências  $f_2$  e  $f_4$ , esse comportamento se inverte, o menor nível de atenuação é registrado para  $WM2 = 2mm$ , e o maior para  $WM2 = 0,5mm$ . Na frequência  $f_3$ , a tendência de variação é distinta, com os níveis de atenuação aumentando na seguinte ordem:  $0,5mm$ ,  $1mm$ ,  $2mm$  e  $1,5mm$ , o que indica um comportamento mais específico nesta faixa de frequência.

Pode-se ver que o aumento de WM2 contribui para um maior nível de atenuação do sinal, resultando em uma rejeição mais acentuada. No entanto, esse aumento pode comprometer a linearidade e a estabilidade da banda de rejeição, introduzindo flutuações indesejadas na resposta. Por outro lado, a redução de WM2 resulta em uma resposta mais uniforme e previsível.

### 4.1.3 Análise da variação do WMA1

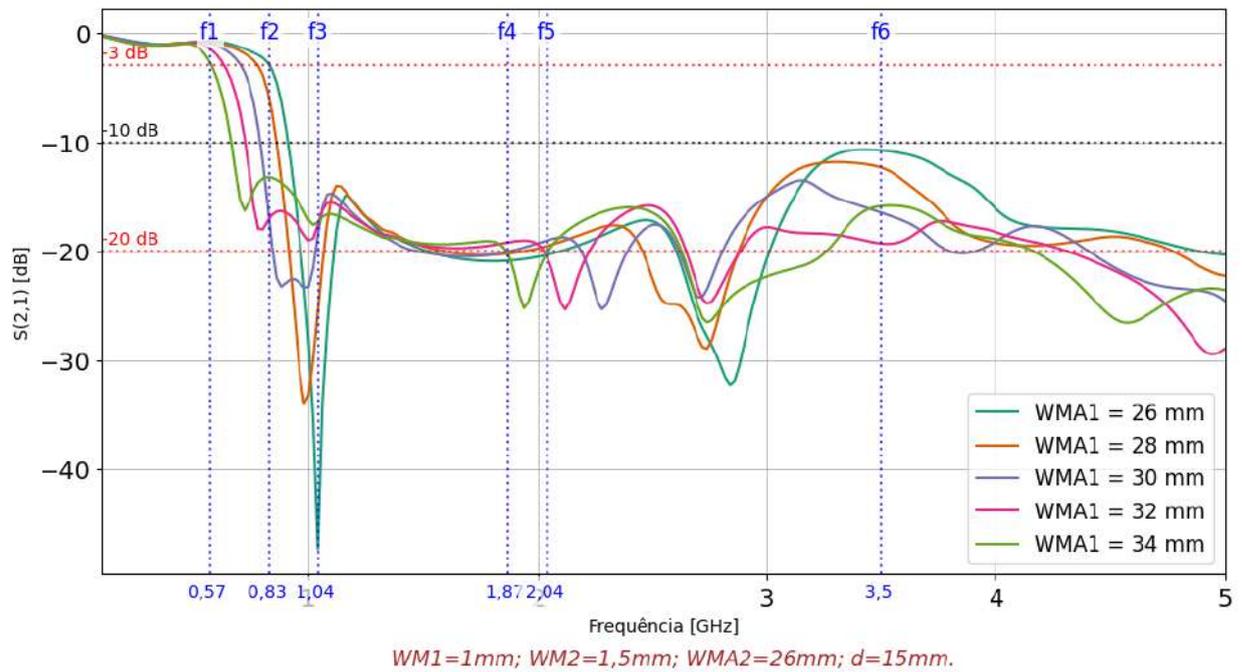
Para a análise da influência do parâmetro WMA1, foram selecionados dois valores acima e dois abaixo do valor inicial ( $30mm$ ), com variações de 2 mm, totalizando os valores de 26 mm a 34 mm. A variação dessa dimensão demonstrou impacto na frequência de corte, na largura da banda de rejeição e no valor da atenuação, como pode ser observado na Figura 18.

Ao analisar a influência do parâmetro WMA1 sobre a  $f_c$ , pode-se notar que um aumento em seu valor resulta em uma redução da  $f_c$  do filtro. Esse comportamento indica uma relação inversamente proporcional. Por exemplo, na análise referente à frequência  $f_1$ , cerca de 0,57 GHz, ocorre a  $f_c$  de quando  $WMA1 = 34mm$ . Já na frequência  $f_2$ , a  $f_c$  atinge 0,83 GHz com  $WMA1 = 16mm$ .

Analisando a banda de transição, observa-se que, para o valor de  $WMA1 = 32mm$ , a  $f_a$  é atingida apenas na frequência  $f_5$ , caracterizando essa variação como a que apresenta a maior largura de banda de transição. Em seguida, destaca-se o valor de  $WMA1 = 34mm$ , cuja  $f_a$  corresponde a  $f_4$ .

A banda de rejeição também varia em função do valor de WMA1. Para  $WMA1 = 26mm$ , pode ser visto o maior valor de atenuação, evidenciado na frequência  $f_3$ , com um pico que atinge aproximadamente 47 dB. No entanto, ao longo da banda de rejeição, essa configuração apresenta a menor média de atenuação, chegando a valores próximos de 10 dB em  $f_6$ .

**Figura 18** – Resposta em frequência do filtro 1 com a variação do WMA1.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.4 Análise da variação do WMA2

Considerando a mesma abordagem aplicada à análise do parâmetro WMA1, a variação de WMA2 também seguiu incrementos de 2 mm em torno de seu valor inicial. Foram analisados valores no intervalo de 22 mm a 30 mm.

Ao analisar a resposta apresentada na Figura 19, nota-se que a  $f_c$  se manteve praticamente constante para a maioria dos valores de WMA2. A única exceção ocorreu quando  $WMA2 = 30mm$ , apresentando uma leve variação, com  $f_c$  em aproximadamente 0,67 GHz, como pode ser observado na frequência  $f_1$ . Nos demais casos, os valores permaneceram próximos a esse valor, sem alterações significativas.

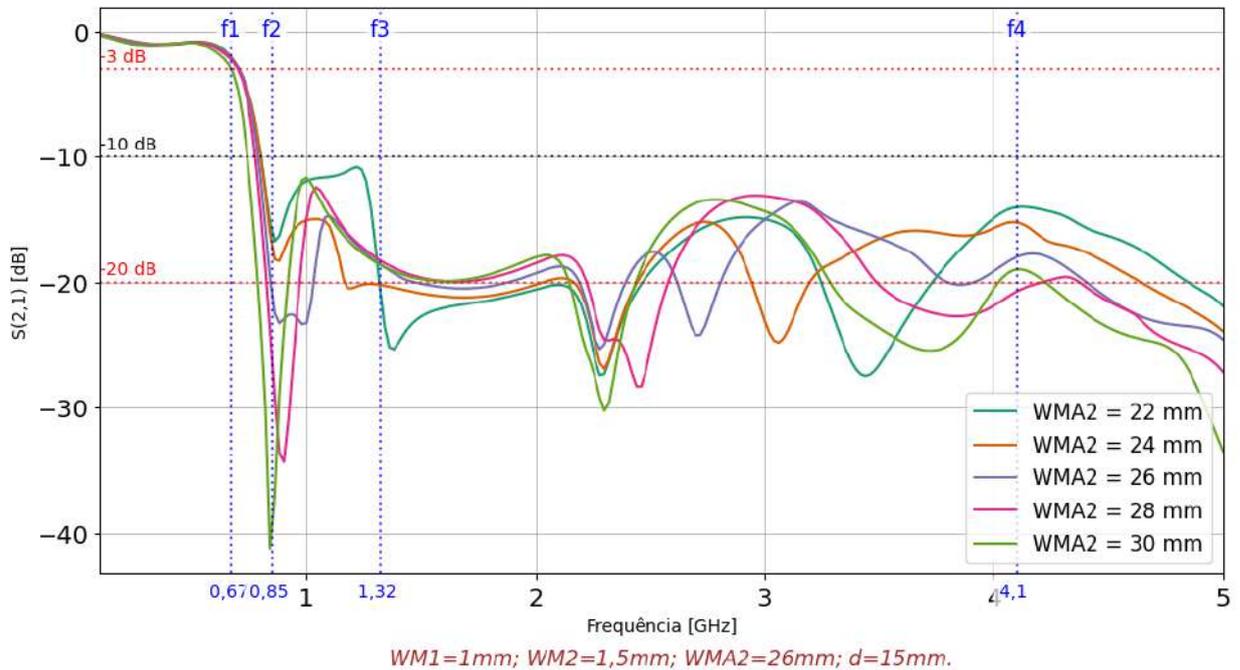
Além disso, a  $f_a$  de menor valor também foi observada quando WMA2 atingiu seu maior valor, 30 mm, tendo a menor banda de transição. Por outro lado, a maior largura de banda de transição foi obtida com o menor valor de  $WMA2 = 22mm$ , conforme evidenciado na frequência  $f_3$ . Nota-se ainda que, para esse mesmo valor (22 mm), antes de a resposta atingir os 20 dB, ocorre um pico de menor atenuação em comparação às demais variações, o que compromete parcialmente o desempenho na faixa de transição.

Adicionalmente, quando  $WMA2 = 30mm$ , é visto o maior valor de atenuação, atingindo aproximadamente 41 dB, conforme identificado na frequência  $f_2$ .

Na frequência  $f_4$ , o menor valor de atenuação foi obtido quando  $WMA2 = 22mm$ , seguido pelas variações de 24mm, 26mm, 30mm, e, por fim, 28mm, que apresentou o

maior valor de atenuação entre os casos e a frequência analisada.

**Figura 19** – Resposta em frequência do filtro 1 com a variação do WMA2.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.5 Análise da variação do d

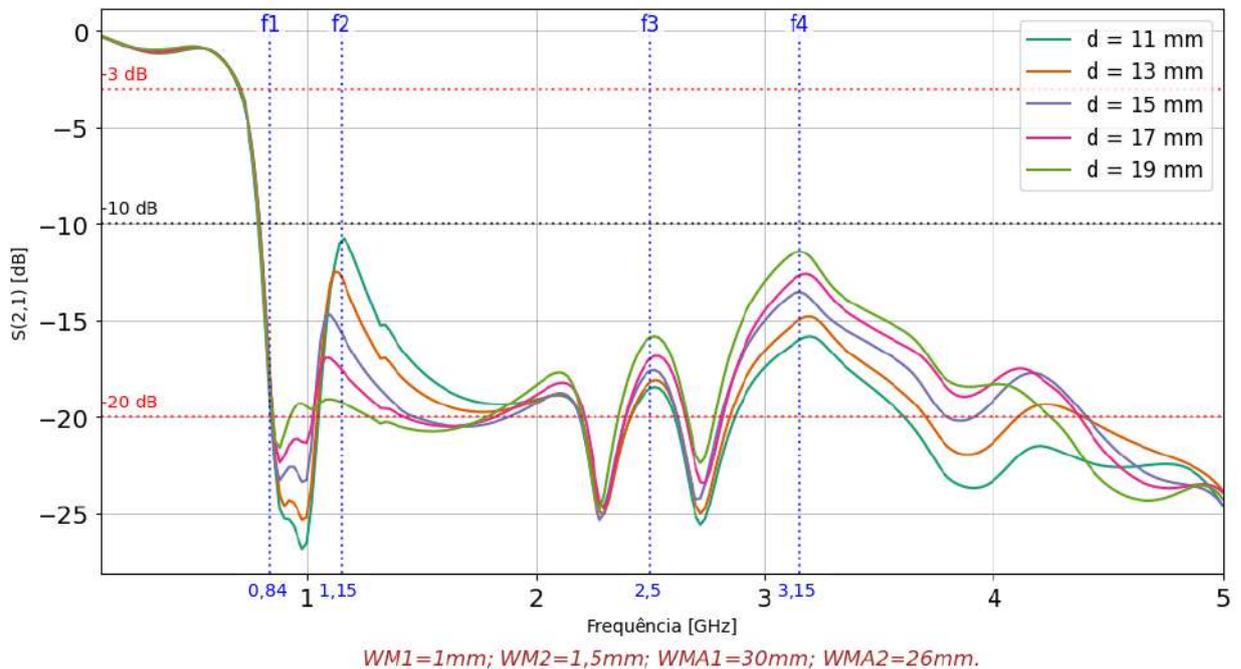
Outro aspecto analisado neste trabalho foi a variação da distância entre as geometrias de Matrioska 1 e 2. Para o filtro em questão, a resposta obtida está apresentada na Figura 20. A variação do parâmetro d foi realizada entre 11 mm e 19 mm, com incrementos de 2 mm.

A banda passante e de transição permanecem praticamente inalteradas com a variação do parâmetro d. No entanto, na frequência f1 até 1 GHz, verifica-se que a atenuação apresenta valores menores à medida que o valor de d aumenta. Por exemplo, para  $d = 11\text{mm}$ , a atenuação é máxima, enquanto para  $d = 19\text{mm}$ , observa-se a menor atenuação nesse ponto.

Na análise da frequência f2, verifica-se que a atenuação é menor para valores reduzidos de d, sendo o menor valor registrado quando  $d = 11\text{mm}$ , e a maior atenuação ocorre com  $d = 19\text{mm}$ . Por outro lado, nas frequências f3 e f4, a redução de d resulta em um maior valor de atenuação, evidenciando o impacto desse parâmetro no comportamento do filtro em diferentes faixas de frequência.

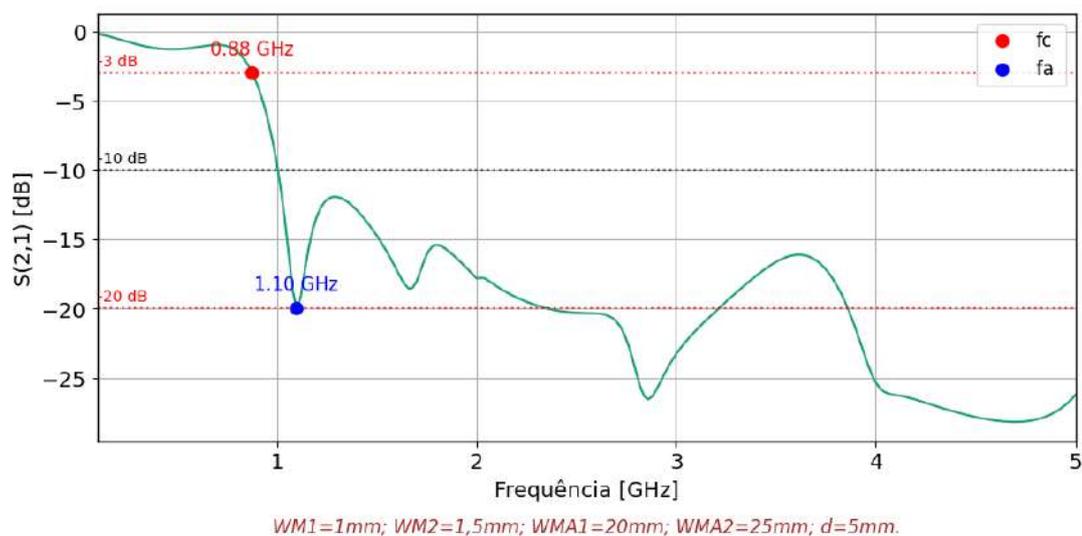
#### 4.2 Análise do filtro 2

A resposta em frequência do segundo filtro é apresentada na Figura 21. Para a análise da variação dos parâmetros, foram considerados os mesmos critérios adotados na avaliação do primeiro filtro. Observa-se que a frequência de corte ocorre em aproxima-

**Figura 20** – Resposta em frequência do filtro 1 com a variação do  $d$ .

Fonte: Autoria própria.

damente 0,88 GHz, enquanto a frequência de atenuação, que define o fim da banda de transição, é registrada em 1,10 GHz. Com base nesses valores, caracteriza-se a banda de transição do filtro.

**Figura 21** – Resposta em frequência do filtro 2.

Fonte: Autoria própria.

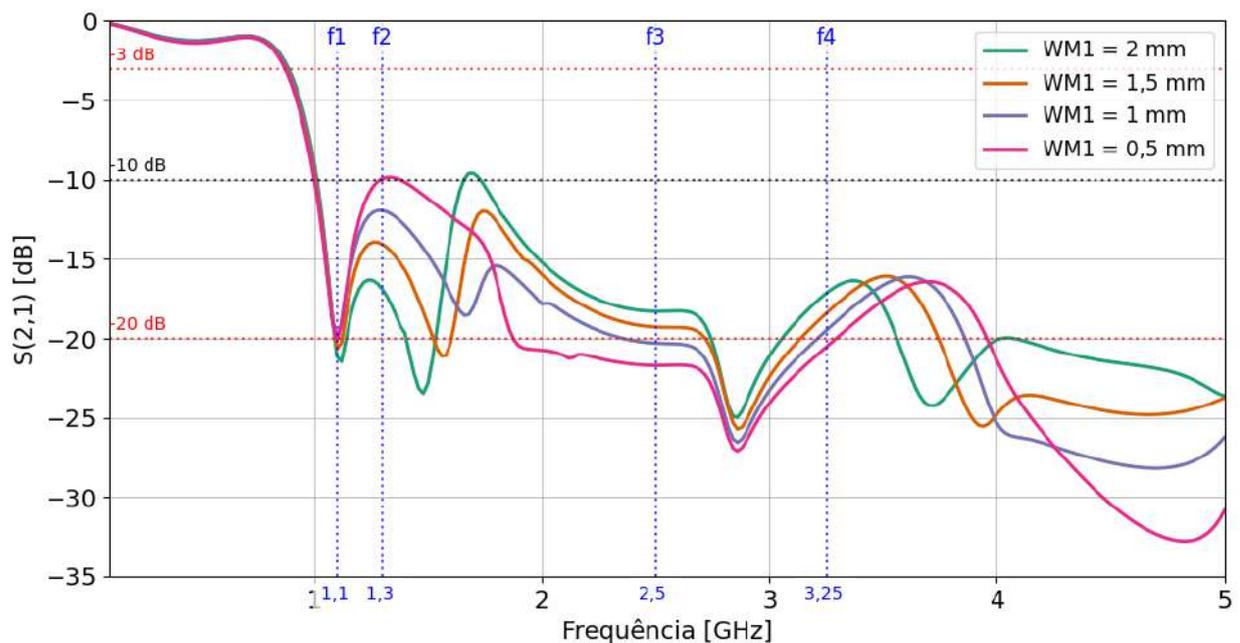
Consequentemente, define-se a banda de rejeição como o intervalo de frequências a partir da  $f_a$  (1,10 GHz) até 5 GHz. Nesse intervalo, o filtro apresenta desempenho satisfatório, com o nível de atenuação mantendo-se consistentemente abaixo de 10 dB e, em grande parte da faixa, abaixo de 15 dB, o que caracteriza uma região de rejeição

ampla e ainda mais eficaz. Por outro lado, a banda passante é definida pelas frequências inferiores à frequência de corte, ou seja, de 0 até 0,88 GHz, onde a transmissão do sinal ocorre com mínima atenuação.

#### 4.2.1 Análise da variação do WM1

Com base na variação do parâmetro WM1, conforme ilustrado na Figura 22, é possível destacar alguns aspectos relevantes. Observa-se que essa variação não provocou alterações significativas na frequência de corte, que se manteve praticamente constante. Entretanto, foram verificadas mudanças nos níveis de atenuação na frequência de atenuação, podendo ser vistas pela frequência  $f_1$ . O maior valor de atenuação foi observado para  $WM1 = 2\text{mm}$ , enquanto os menores valores ocorreram para  $WM1 = 1\text{mm}$  e  $WM1 = 0,5\text{mm}$ , os quais apresentaram desempenho semelhante nessa frequência.

**Figura 22** – Resposta em frequência do filtro 2 com a variação do WM1.



$WM1=1\text{mm}; WM2=1,5\text{mm}; WMA1=30\text{mm}; WMA2=26\text{mm}.$

**Fonte:** Autoria própria.

A atenuação ao longo da banda de rejeição apresentou mudanças perceptíveis, evidenciando a sensibilidade do filtro às variações do parâmetro analisado. Na frequência  $f_2$ , nota-se que o menor valor de atenuação ocorre quando o WM1 assume seu menor valor, enquanto o maior valor de atenuação é registrado com o maior valor de WM1. Nesse caso, é possível afirmar que a atenuação apresenta relação diretamente proporcional ao aumento de WM1, nesta frequência.

Por outro lado, nas frequências  $f_3$  e  $f_4$  verifica-se um comportamento inverso: os maiores valores de WM1 resultam em menor atenuação, enquanto os menores valores

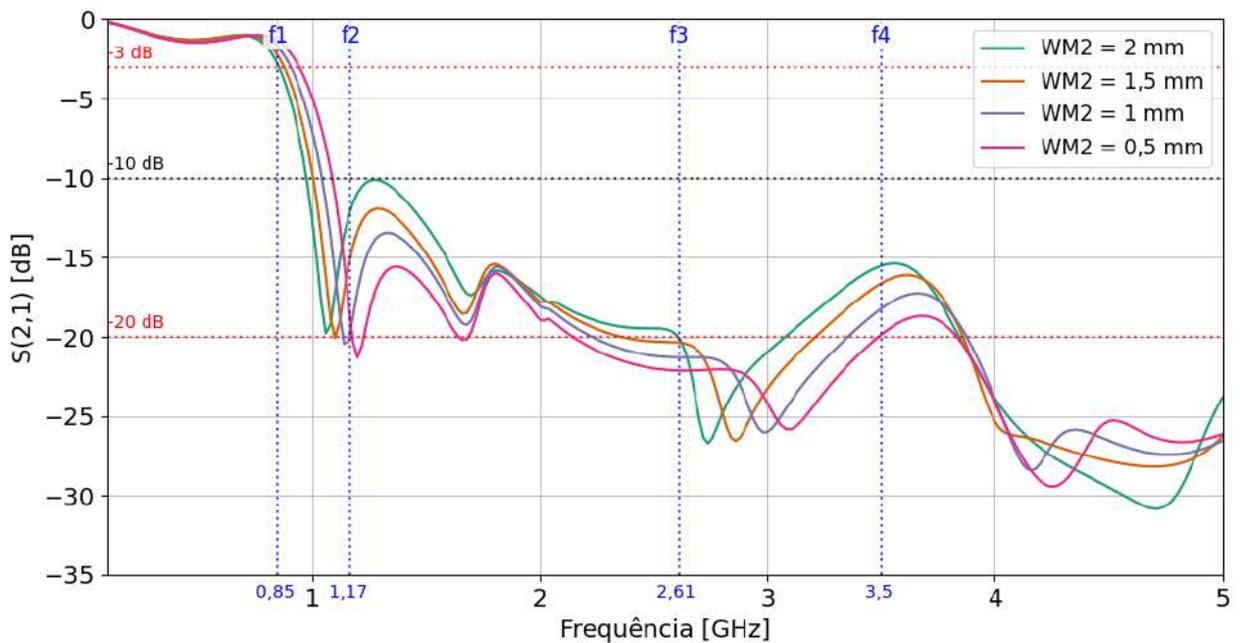
proporcionam maior profundidade de atenuação.

Além disso, é importante destacar que, para os extremos analisados ( $WM1 = 0,5mm$  e  $WM1 = 2mm$ ), a resposta do filtro ultrapassa o limite de 10 dB em determinados pontos da banda de rejeição, o que compromete sua eficácia. Dessa maneira, evidencia-se que as melhores respostas são obtidas quando o valor de  $WM1$  é igual a  $1,0mm$  e  $1,5mm$ . Nesses casos, o filtro apresenta uma atenuação mais estável e profunda ao longo da faixa de rejeição, mantendo-se consistentemente abaixo de 10 dB, o que indica um desempenho mais eficiente na supressão de sinais indesejados.

#### 4.2.2 Análise da variação do $WM2$

A partir da análise da variação do parâmetro  $WM2$ , apresentada na Figura 23, verifica-se que a frequência de corte apresenta pequenas variações, situando-se entre as frequências  $f1$  e 1 GHz. Conseqüentemente, a frequência de atenuação também é afetada. Para  $WM2 = 0,5mm$ , a fa ocorre na frequência  $f2$  ( $1,17GHz$ ), enquanto para  $WM2 = 2mm$ , a fa só é identificada na frequência  $f3$  ( $2,61GHz$ ). Essa diferença implica em alterações na largura da banda de transição, indicando a sensibilidade desse parâmetro no ajuste fino do desempenho do filtro.

**Figura 23** – Resposta em frequência do filtro 2 com a variação do  $WM2$ .



$WM1=1mm$ ;  $WM2=1,5mm$ ;  $WMA1=30mm$ ;  $WMA2=26mm$ .

Fonte: Autoria própria.

Ao observar a banda de rejeição, nota-se que o parâmetro  $WM2$  exerce influência significativa sobre o desempenho do filtro. Para valores menores de  $WM2$ , como  $0,5mm$ , a atenuação média ao longo da banda de rejeição é mais profunda e uniforme, além de apresentar uma transição mais abrupta, caracterizada por uma queda rápida e acentuada

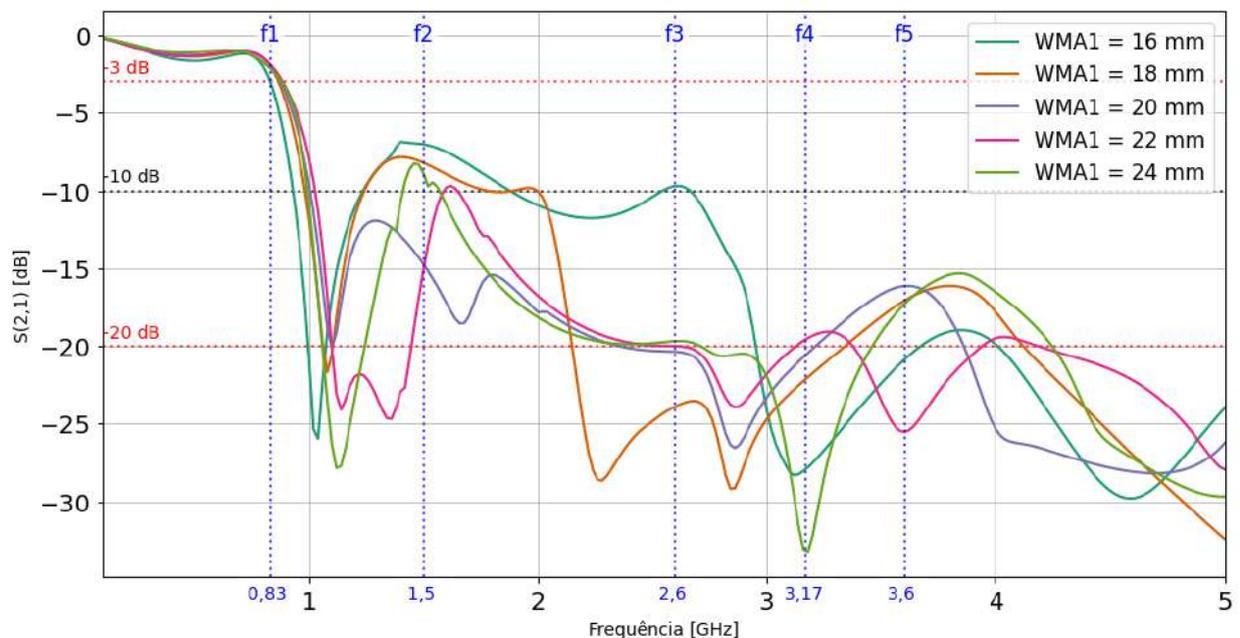
na resposta em frequência. Em contrapartida, quando WM2 assume o maior valor analisado ( $2\text{mm}$ ), há uma redução na eficácia da rejeição, com valores de atenuação variando entre 10 dB e 20 dB em determinadas regiões do espectro.

Essa tendência é especialmente evidente nas frequências  $f_3$  e  $f_4$ , onde se observa que os menores valores de WM2 resultam nas maiores atenuações, enquanto os maiores valores de WM2 apresentam desempenho inferior em termos de atenuação.

### 4.2.3 Análise da variação do WMA1

Na Figura 24 apresenta a resposta em frequência do filtro passa-baixa para diferentes valores do parâmetro WMA1, variando de 16 mm a 24 mm em incrementos de 2 mm. Nota-se que esse parâmetro exerce influência relevante sobre o desempenho do filtro, uma vez que sua variação impacta diretamente o comportamento da resposta em frequência.

**Figura 24** – Resposta em frequência do filtro 2 com a variação do WMA1.



*WM1=1mm; WM2=1,5mm; WMA1=30mm; WMA2=26mm.*

**Fonte:** Autoria própria.

Inicialmente, ao realizar a análise necessária, é observado que a frequência de corte sofre variações, especialmente quando o valor de  $WMA1 = 16\text{mm}$ . Nessa configuração, a  $f_c$  é inferior em comparação às demais variações, sendo representada por 0,83 GHz ( $f_1$ ) e apresentando, também, a menor largura de banda de transição. Nota-se, portanto, que cada valor adotado para o parâmetro WMA1 resulta em uma largura de banda de transição distinta, com exceção dos casos em que WMA1 é igual a 18mm e 24mm.

Nas frequências  $f_2$ , é perceptível que os valores de WMA1 iguais a 16mm, 18mm e 24mm apresentam as menores atenuações, variando entre 5 dB e 10 dB, o que compromete

a eficiência do filtro nessas faixas. A curva correspondente a  $WMA = 22mm$  também apresenta trechos com atenuações acima de 10 dB.

Para valor de  $WMA1 = 24mm$ , a curva apresenta uma resposta com atenuações mais profundas, atingindo níveis inferiores a 30 dB, na frequência  $f4$ .

Dentre os valores analisados, o parâmetro  $WMA1 = 20mm$  apresentou o melhor desempenho, sendo o único caso em que toda a banda de rejeição se manteve consistentemente abaixo de 10 dB, atendendo de forma eficaz ao critério de atenuação estabelecido neste trabalho. Mesmo na frequência  $f5$ , onde apresentou a menor atenuação em comparação aos demais valores de  $WMA1$ , o valor ainda permaneceu abaixo de 15 dB, evidenciando sua robustez e uniformidade na supressão de sinais indesejados ao longo de toda a faixa de rejeição.

#### 4.2.4 Análise da variação do WMA2

Outro critério avaliado foi a influência da variação do parâmetro  $WMA2$ , que foi analisada no intervalo de  $21mm$  a  $29mm$ , com incrementos regulares. A resposta em frequência para cada valor é apresentada na Figura 25.

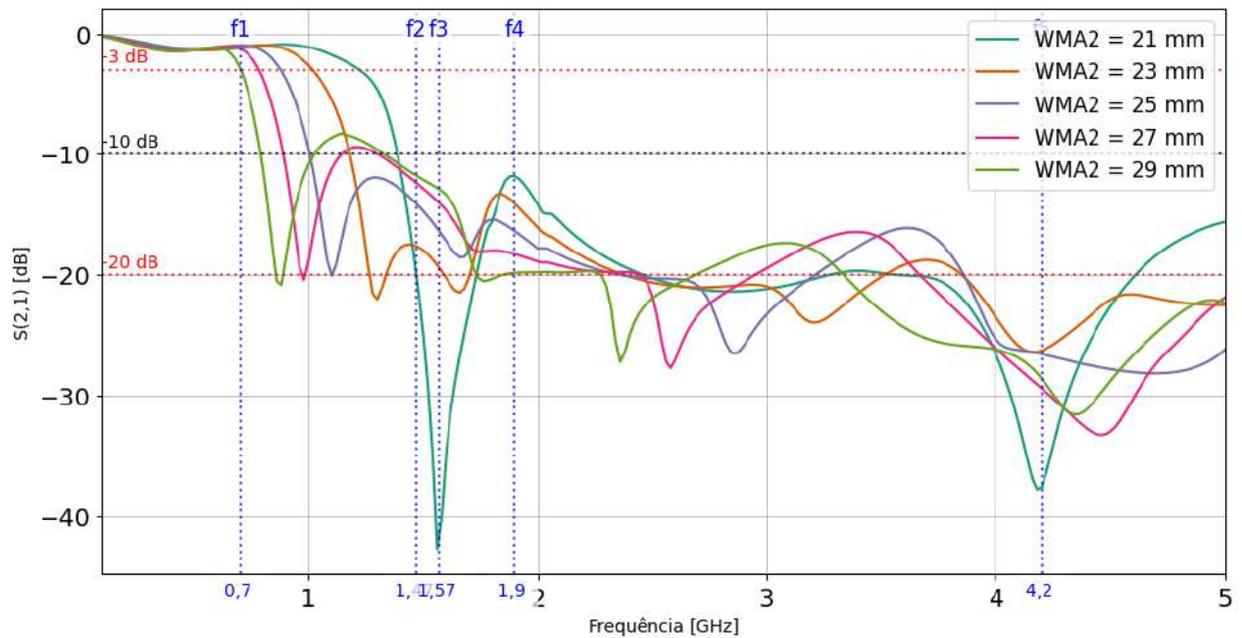
A frequência de corte apresenta variações significativas em função do comprimento de  $WMA2$ . Para  $WMA2 = 29mm$ , a frequência de corte é de 0,7 GHz, representada pela  $f1$ . Observa-se que, à medida que o comprimento de  $WMA2$  diminui, há um aumento progressivo da frequência de corte. Portanto, conclui-se que existe uma relação inversamente proporcional entre o comprimento de  $WMA2$  e  $f_c$ .

O mesmo comportamento é observado para  $f_a$ : quanto menor o valor de  $WMA2$ , maior é a frequência correspondente  $f_a$ . Isso pode ser evidenciado na frequência  $f2$ , onde  $f_a$  associada ao valor de  $WMA2 = 21mm$  é a mais elevada, confirmando a tendência de que a redução do comprimento de  $WMA2$  desloca a banda de transição para frequências mais altas.

Quando o valor de  $WMA2$  é reduzido para  $21mm$ , observa-se um pico de atenuação significativo, atingindo aproximadamente 42 dB na região correspondente à frequência  $f3$  que é de 1,57 GHz, evidenciando uma ressonância acentuada. No entanto, a curva apresenta uma recuperação rápida logo após essa frequência, o que compromete a continuidade e a largura efetiva da banda de rejeição, conforme observado na frequência  $f4$ . Já em  $f5$ , a resposta volta a apresentar uma atenuação elevada, em torno de 36 dB.

Ao analisar a região em torno da frequência  $f4$ , percebe-se que o valor mínimo de atenuação ocorre quando  $WMA2$  é igual a  $21mm$ , indicando uma menor eficácia na rejeição de sinais nessa faixa. Em contrapartida, quando  $WMA2$  assume seu maior valor, de  $29mm$ , verifica-se a maior atenuação nessa mesma frequência.

As respostas obtidas para os valores de  $WMA2$  entre  $25mm$  e  $29mm$  apresentaram

**Figura 25** – Resposta em frequência do filtro 2 com a variação do WMA2.

$WM1=1mm$ ;  $WM2=1,5mm$ ;  $WMA1=20mm$ ;  $d=5mm$ .

Fonte: Autoria própria.

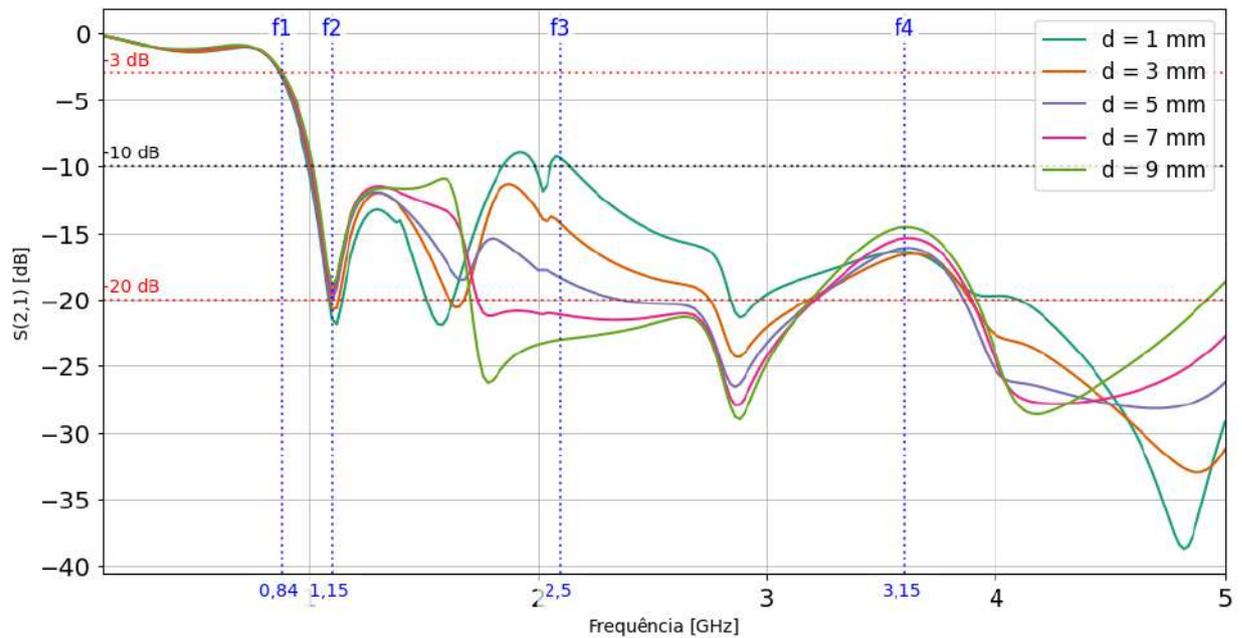
comportamentos semelhantes, diferenciando-se pela intensidade da atenuação. Nota-se que, nas curvas correspondentes a  $27mm$  e  $29mm$ , parte da resposta ultrapassa o limite de  $10\text{ dB}$ , o que não atende aos critérios estabelecidos neste trabalho. Por outro lado, a curva referente ao valor de  $23mm$  apresentou um desempenho satisfatório, mantendo uma banda de rejeição contínua com atenuação adequada.

#### 4.2.5 Análise da variação do $d$

A Figura 26 apresenta a resposta em frequência do filtro considerando a variação da distância entre as geometrias, com valores variando de  $1\text{ mm}$  a  $9\text{ mm}$ , em incrementos de  $2\text{ mm}$ .

Ao analisar a banda de transição, definida como a faixa de frequência entre  $f_1$  e  $f_2$ , pode-se observar que ela permanece praticamente inalterada com a variação do espaçamento entre as geometrias.

Analisando a frequência  $f_3$ , observa-se que o maior valor de atenuação ocorre quando a estrutura DGS possui seu maior espaçamento, com  $d = 9mm$ , enquanto o menor valor de atenuação é registrado para  $d = 1mm$ , valor no qual a resposta ultrapassa os  $-10\text{ dB}$ , comprometendo a eficiência da rejeição nesse ponto. A variação do parâmetro  $d$  afeta principalmente o acoplamento mútuo entre os ressonadores.

**Figura 26** – Resposta em frequência do filtro 2 com a variação do  $d$ .

$WM1=1mm$ ;  $WM2=1,5mm$ ;  $WMA1=20mm$ ;  $WMA2=25mm$ .

Fonte: Autoria própria.

Já na frequência  $f_4$ , acontece um comportamento inverso ao verificado em  $f_3$ . O menor valor de atenuação ocorre quando o espaçamento entre as estruturas DGS é de  $9mm$ , enquanto os maiores valores de atenuação são registrados para  $d = 3mm$  e, em seguida,  $d = 1mm$ , com desempenhos bastante próximos. Esse resultado evidencia que, para essa frequência, valores menores de  $d$  favorecem uma rejeição mais profunda, enquanto maiores espaçamentos reduzem a intensidade da atenuação.

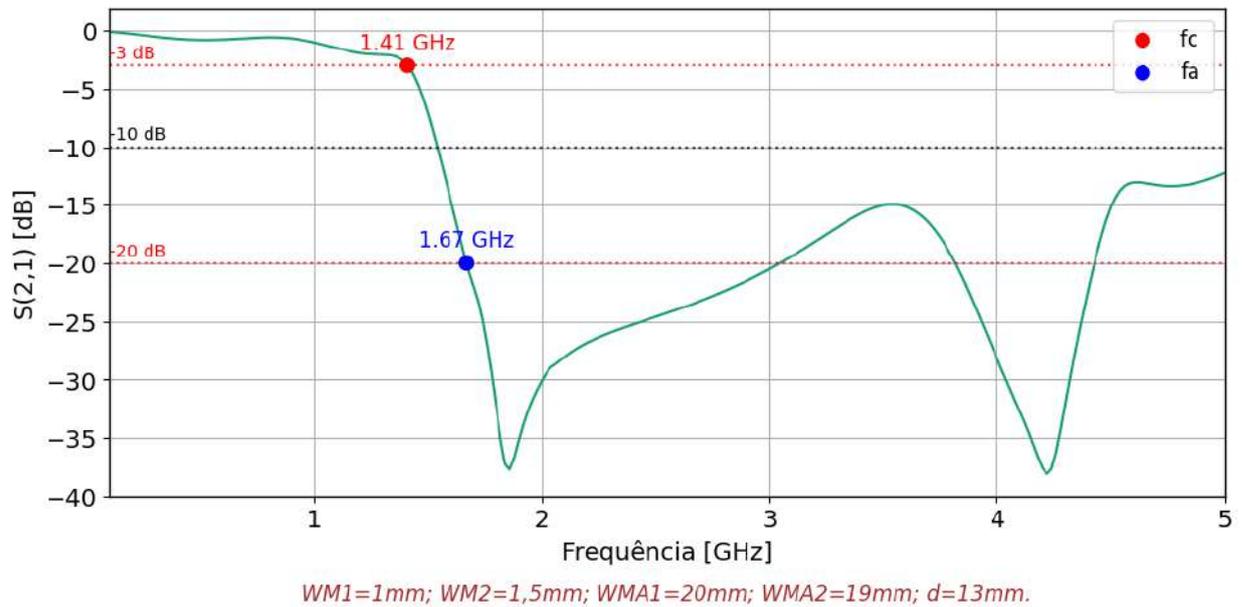
### 4.3 Análise do filtro 3

O filtro 3, quando comparado aos filtros anteriores, apresenta características distintas em sua resposta em frequência, destacando-se pelos maiores níveis de atenuação, atingindo valores próximos a 36 dB. Além disso, este filtro se destaca por apresentar uma frequência de corte mais elevada, atingindo 1,41 GHz, o que resulta em uma banda passante mais ampla.

A resposta do Filtro 3 pode ser observada na Figura 27. Nota-se que este filtro apresenta uma banda de transição mais ampla em comparação aos filtros anteriores. Como consequência, a banda de rejeição é relativamente menor, sendo definida a partir de 1,67 GHz até 5 GHz. Ao longo dessa faixa, a resposta em frequência exibe variações significativas de atenuação, alternando entre valores mais profundos e regiões de menor supressão, o que indica uma rejeição menos uniforme em comparação com os demais filtros analisados.

Seguindo o mesmo padrão de análise adotado neste trabalho, foram avaliadas as

Figura 27 – Resposta em frequência do filtro 3.



Fonte: Autoria própria.

variações dos parâmetros WM1, WM2, WMA1, WMA2 e d para o filtro 3, cujos resultados estão apresentados nas Figuras 28, 29, 30, 31 e 32, respectivamente.

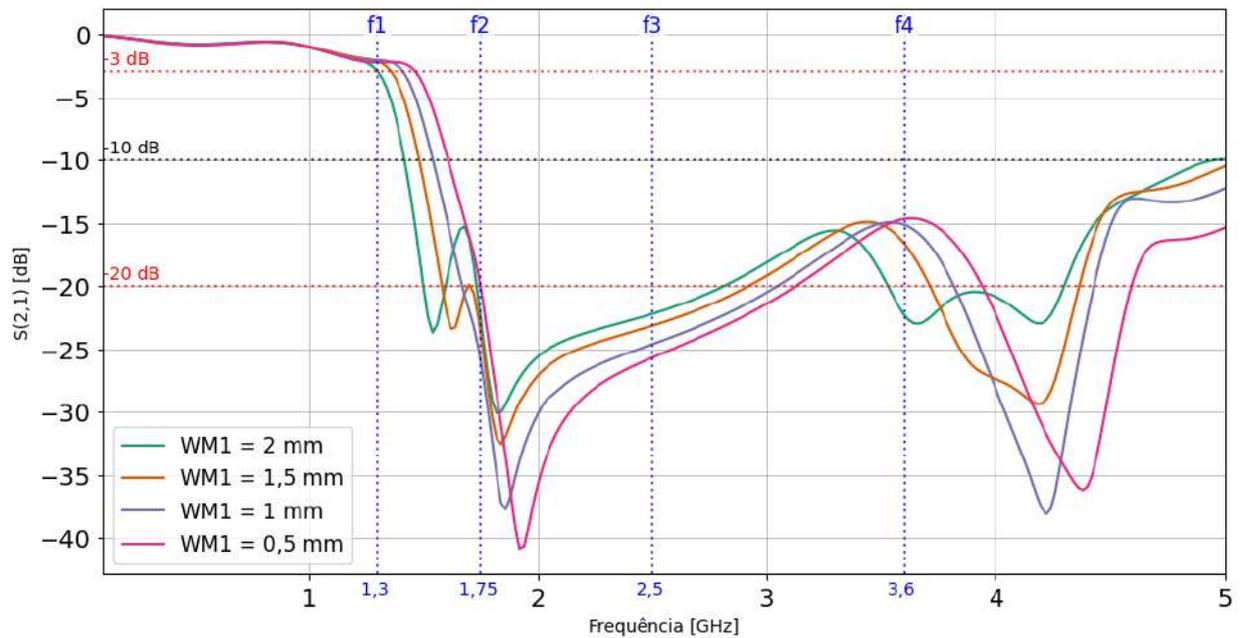
#### 4.3.1 Análise da variação do WM1

Com a variação do parâmetro WM1, é possível notar que a  $f_c$  é afetada. Especificamente, a redução do valor de WM1 resulta em um deslocamento da  $f_c$  para frequências mais altas, evidenciando a influência direta desse parâmetro na definição da faixa passante do filtro, sendo representada por 1, 3 GHz. Na frequência  $f_1$ , percebe-se que o menor valor de  $f_c$  ocorre quando  $WM1 = 2mm$ . Já na  $f_2$ , observa-se a  $f_a$  mais elevada quando WM1 assume o menor valor analisado,  $0,5mm$ .

Na análise da banda de rejeição, especificamente em torno da  $f_3$ , é perceptível que a redução do valor de WM1 resulta em um aumento no nível de atenuação. O maior valor de atenuação ocorre quando  $WM1 = 0,5mm$ , enquanto o menor valor é registrado para  $WM1 = 2mm$ . Esse comportamento evidencia que valores menores de WM1 favorecem uma rejeição mais eficiente nessa faixa do espectro.

No entanto, ao se analisar a frequência  $f_4$ , observa-se um comportamento diferente em relação à  $f_3$ . Nessa faixa, o menor valor de atenuação ocorre para  $WM1 = 0,5mm$ , seguido pelos valores de  $1mm$  e  $1,5mm$ . O maior valor de atenuação é registrado para  $WM1 = 2mm$ , indicando que, nesse caso, o aumento do parâmetro WM1 contribui para uma maior eficiência de rejeição na frequência 3,6 GHz ( $f_4$ ).

Em geral, a curva correspondente a  $WM1 = 0,5mm$  apresenta o melhor desempenho, com níveis de atenuação mais elevados em grande parte da faixa de rejeição. Em

**Figura 28** – Resposta em frequência do filtro 3 com a variação do WM1.

$WM_2=1,5mm$ ;  $WMA_1=20mm$ ;  $WMA_2=19mm$ ;  $d=13mm$ .

Fonte: Autoria própria.

contraste, configurações com  $WM_1 = 2mm$  apresentam desempenho inferior em termos de atenuação, com piores resultados nas proximidades de 5 GHz, onde a atenuação chega a 10 dB.

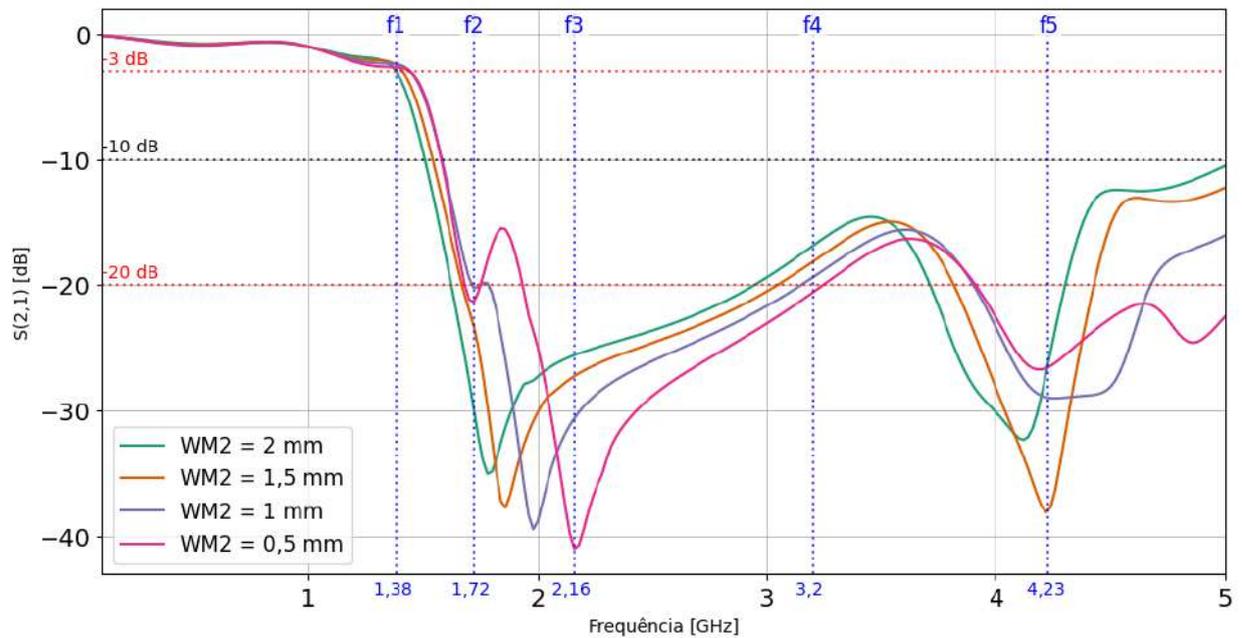
### 4.3.2 Análise da variação do WM2

A variação do parâmetro WM2 resulta em alterações sutis na frequência de corte. Observa-se que, para os valores de WM2 igual a 0,5mm e 1mm, a  $f_c$  permanece inalterada. No entanto, as fa diferem entre si para estes valores, sendo a fa mais elevada quando  $WM_2 = 1mm$ . Dessa forma, a banda de transição para as diferentes configurações está entre as frequências  $f_1$  e  $f_2$ , onde  $f_1$  representa a  $f_c$  da curva com  $WM_2 = 2mm$ , e  $f_2$  corresponde à fa da curva com  $WM_2 = 1mm$ .

Ao analisar a banda passante, nota-se uma queda gradual na resposta em frequência até atingir a fa.

Em relação à banda de rejeição, o parâmetro WM2 demonstrou influência significativa. Por volta da frequência  $f_4$ , observa-se que os valores menores de WM2 resultaram em maior valor de atenuação, enquanto os valores mais elevados apresentaram desempenho inferior, com menor rejeição. Já na frequência  $f_5$ , o maior valor de atenuação foi registrado para  $WM_2 = 1,5mm$ , seguido de perto por  $WM_2 = 1,0mm$ . Nessa mesma frequência, os valores de atenuação para  $WM_2 = 0,5mm$  e  $WM_2 = 2mm$  mostraram-se iguais.

Para  $WM_2 = 0,5mm$ , a rejeição mostrou-se mais acentuada, com atenuações que

**Figura 29** – Resposta em frequência do filtro 3 com a variação do WM2.

$WM1=1mm$ ;  $WMA1=20mm$ ;  $WMA2=19mm$ ;  $d=13mm$ .

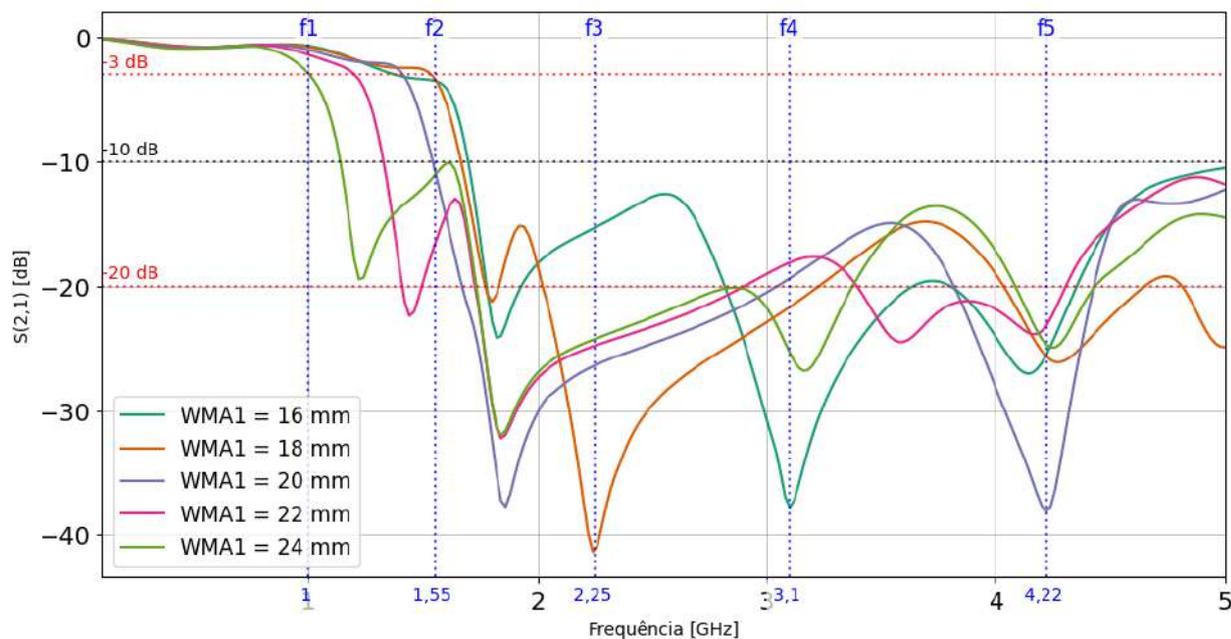
Fonte: Autoria própria.

atingem aproximadamente 41 dB em torno da frequência 2,16GHz (f3), evidenciando uma forte supressão do sinal nessa faixa.

### 4.3.3 Análise da variação do WMA1

Ao analisar a  $f_c$ , evidencia-se que o aumento do valor de WMA1 provoca o deslocamento da banda passante para frequências mais baixas. Isso indica uma relação inversamente proporcional entre o comprimento de WMA1 e a  $f_c$  de operação do filtro. Quando WMA1 atinge seu maior valor, 24 mm, a frequência de corte se posiciona em torno de 1,0 GHz, identificada na Figura 30 como f1. Em contraste, ao reduzir o valor para 18 mm, essa frequência se desloca para aproximadamente 1,55 GHz, representada pela f2.

Ao analisar a  $f_a$ , percebe-se que o menor valor foi obtido quando  $WMA1 = 22mm$ , seguido de  $WMA1 = 20mm$ . Para o caso em que  $WMA1 = 24mm$ , verifica-se uma queda na resposta entre as frequências f1 e f2; entretanto, essa queda não atinge o nível de 20 dB, valor considerado como referência para definição da  $f_a$ . Dessa forma, a  $f_a$  dessa curva só é atingida após f2, evidenciando uma transição mais lenta. Já para os valores  $WMA1 = 16mm$  e  $18mm$ , observa-se que ambos apresentam a mesma frequência de atenuação, indicando um comportamento semelhante na região de transição.

**Figura 30** – Resposta em frequência do filtro 3 com a variação do WMA1.

*WM1=1mm; WM2=1,5mm; WMA2=19mm; d=13mm.*

**Fonte:** Autoria própria.

A banda de rejeição é significativamente influenciada pela variação do parâmetro WMA1. Na análise da frequência  $f_3$ , observa-se que o maior valor de atenuação ocorre quando  $WMA1 = 18\text{mm}$ , enquanto o menor valor de atenuação é registrado para  $WMA1 = 16\text{mm}$ . Os demais valores de WMA1 apresentam variações de atenuação mais sutis, com diferenças pouco expressivas entre si.

Já na frequência  $f_4$ , nota-se um comportamento distinto. O maior valor de atenuação é obtido quando  $WMA1 = 16\text{mm}$ , seguido por  $WMA1 = 24\text{mm}$ . Por outro lado, o menor valor de atenuação ocorre para  $WMA1 = 22\text{mm}$ . Isso indica que, nessa faixa de frequência, os extremos do parâmetro (menor e maior valor de WMA1) resultam nas respostas mais eficazes em termos de rejeição de sinal.

Na frequência  $f_5$ , o maior valor de atenuação é alcançado quando  $WMA1 = 22\text{mm}$ , valor intermediário dentro do conjunto de variações analisadas. Esse resultado sugere que, nesta faixa de frequência, o melhor desempenho do filtro não está necessariamente associado aos valores extremos de WMA1, mas sim a um valor moderado.

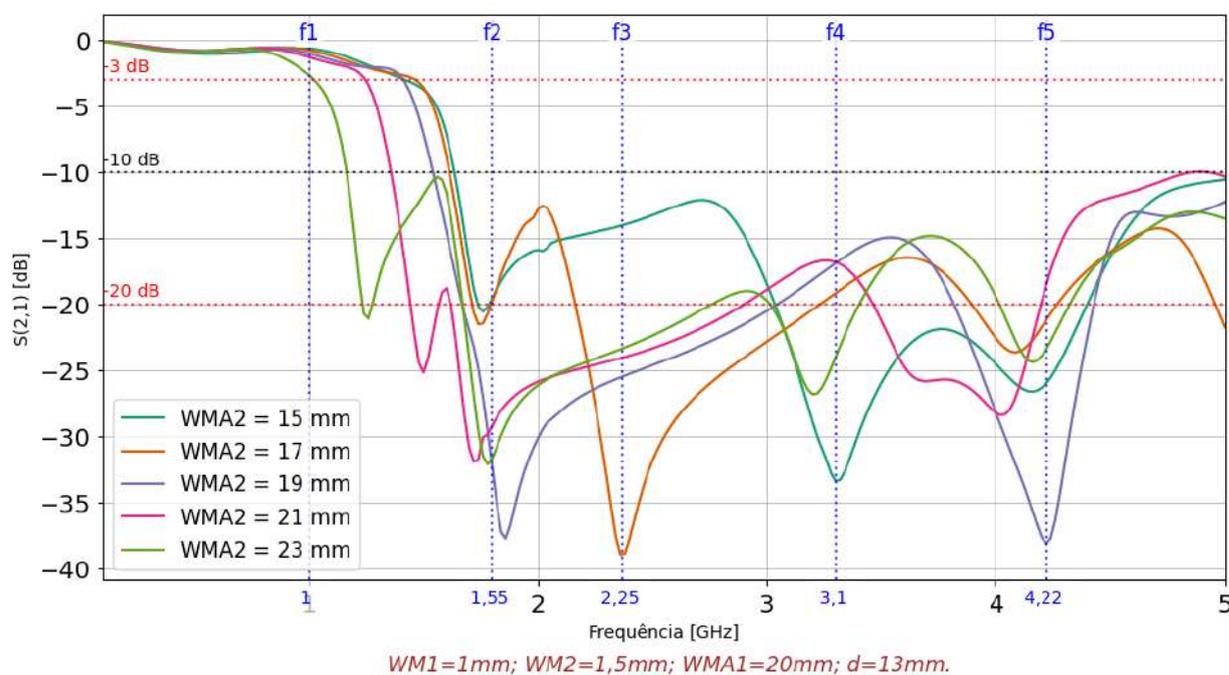
#### 4.3.4 Análise da variação do WMA2

Para a variação do parâmetro WMA2, é notório que a  $f_c$  apresenta alterações relevantes conforme os valores adotados. A menor  $f_c$  é identificada na frequência 1 GHz ( $f_1$ ), ocorrendo quando  $WMA2 = 23\text{mm}$ , seguida pela curva correspondente a  $WMA2 = 21\text{mm}$ . Já para os valores de WMA2 iguais a 15, 17 e 19mm, a  $f_c$  permanece constante,

indicando uma certa estabilidade nesses casos.

Quanto à frequência de atenuação, embora os valores de  $f_c$  possam coincidir para alguns parâmetros, os valores de  $f_a$  se diferenciam, evidenciando variações nas larguras das bandas de transição. Em todas as curvas analisadas, a banda de transição está situada entre as frequências  $f_1$  e  $f_2$ . Além disso, observa-se uma relação inversamente proporcional entre o valor de WMA2 e  $f_a$ ; quanto menor o valor de WMA2, maior é  $f_a$ . Essa tendência reforça a influência significativa desse parâmetro no controle da seletividade e da largura da banda de transição do filtro.

**Figura 31** – Resposta em frequência do filtro 3 com a variação do WMA2.



**Fonte:** Autoria própria.

Ao analisar a banda de rejeição em três pontos distintos do espectro, correspondentes às frequências  $f_3$ ,  $f_4$  e  $f_5$ , é possível observar variações significativas nos níveis de atenuação em função das alterações do parâmetro WMA2. Na frequência  $f_3$ , o maior valor de atenuação foi obtido quando  $WMA2 = 17\text{mm}$ , enquanto o menor valor de atenuação ocorreu com  $WMA2 = 15\text{mm}$ . Esse comportamento é semelhante ao observado anteriormente na análise de variação de WMA1 para essa mesma frequência.

Na frequência  $f_4$ , os maiores níveis de atenuação foram registrados para os valores extremos da variação, com  $WMA2 = 15\text{mm}$  apresentando o maior pico de atenuação, seguido por  $WMA2 = 23\text{mm}$ . Já para os valores de WMA2 correspondentes a 19 mm e 21 mm, a resposta teve os mesmos níveis de atenuação.

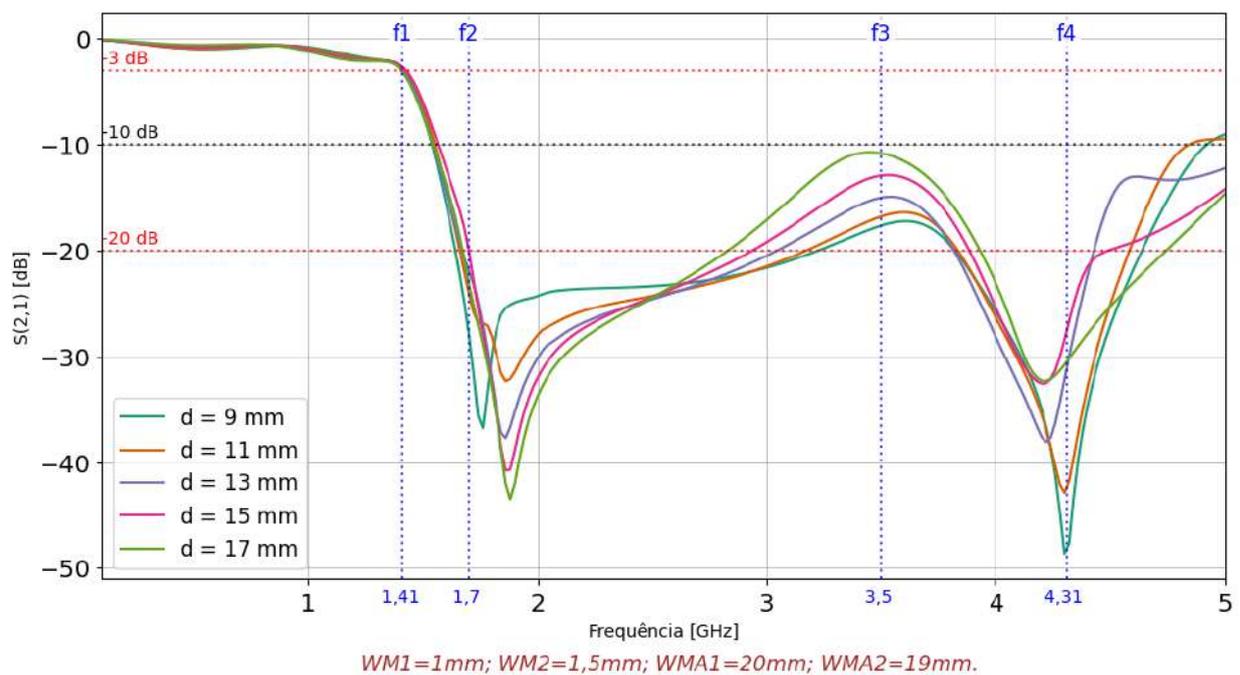
Por fim, na frequência  $f_5$ , o comportamento se inverte parcialmente, com o maior valor de atenuação sendo observado quando WMA2 foi ajustado para 19 mm, enquanto

o menor valor de atenuação ocorreu com WMA2 igual a 21 mm. Esse resultado reforça a influência direta desse parâmetro na resposta em frequência do filtro, demonstrando que variações sutis no comprimento de WMA2 podem impactar significativamente a profundidade da atenuação nas diferentes regiões da banda de rejeição.

#### 4.3.5 Análise da variação do $d$

Com a modificação nos valores da distância entre as geometrias para este filtro, temos que a frequência de corte permanece praticamente inalterada, mantendo-se constante em torno de 1,41 GHz, conforme evidenciado pela frequência  $f_1$ . Isso indica que esse parâmetro não exerce influência direta sobre a definição da  $f_c$ , não comprometendo a largura da banda passante do filtro. No entanto, ao analisar a frequência de atenuação, representada por  $f_2$ , percebe-se que houve alterações mais sutis entre as curvas, sugerindo que, embora o espaçamento entre as geometrias não impacte significativamente a  $f_c$ , ele pode influenciar levemente o comportamento da banda de transição.

**Figura 32** – Resposta em frequência do filtro 3 com a variação do  $d$ .



**Fonte:** Autoria própria.

Para o valor de  $d = 17$ mm, evidencia que na faixa correspondente à frequência  $f_3$  ocorre a menor atenuação, com valores próximos de 10 dB, representando o pior desempenho entre os casos analisados nessa frequência. Por outro lado, o maior valor de atenuação em  $f_3$  é obtido quando  $d = 9$ mm, indicando uma rejeição mais profunda. Já na frequência  $f_4$ , o comportamento se inverte parcialmente: o maior valor de atenuação continua sendo observado para  $d = 9$ mm, seguido por  $d = 11$ mm. Os valores de  $d = 13$ mm e  $d = 17$ mm apresentam desempenho semelhante, com atenuações intermediárias, enquanto o menor

valor de atenuação nesta faixa ocorre para  $d = 15mm$ , sugerindo uma menor eficácia na rejeição do sinal nessa configuração específica.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Considerações finais

Este trabalho teve como propósito a análise de filtros passa-baixa com estruturas DGSs baseadas na geometria Matrioska, com o objetivo de projetar uma configuração capaz de apresentar uma larga banda de rejeição.

O desenvolvimento deste trabalho proporcionou, inicialmente, um estudo aprofundado sobre os tipos de filtros, linhas de microfita, estruturas DGSs e a geometria Matrioska, abordando seus princípios de funcionamento, definições e características. Os LPFs e a geometria Matrioska receberam atenção especial, por serem a base escolhida para a proposta deste projeto. Foi realizada uma revisão bibliográfica de trabalhos anteriores, seguida da descrição detalhada da forma geométrica Matrioska e da definição das equações iniciais utilizadas no dimensionamento do filtro.

A obtenção dos resultados das análises numéricas foi realizada por meio de simulações no software Ansys HFSS, que possibilitou a extração dos parâmetros necessários para a avaliação do desempenho dos filtros projetados.

O filtro proposto neste trabalho incorporou duas geometrias baseadas na estrutura Matrioska aplicadas em DGS. Foram desenvolvidos três modelos distintos de filtros, cada um com dimensões diferentes para os parâmetros WMA1, WMA2 e a distância  $d$ . Além disso, foram realizadas simulações variando cinco parâmetros geométricos: WM1, WM2, WMA1, WMA2 e  $d$ . Essas variações foram aplicadas individualmente a cada filtro, com o objetivo de avaliar sua influência no desempenho eletromagnético.

Os três filtros apresentados demonstraram resultados satisfatórios com base nos critérios estabelecidos neste trabalho, especialmente no que se refere à banda de rejeição, onde os valores de atenuação permaneceram inferiores a  $10dB$ . Além de atenderem ao critério de larga banda de rejeição, os filtros apresentaram uma banda de rejeição considerável, mesmo com as variações observadas ao longo dessa faixa.

Dentre os três modelos desenvolvidos, o filtro 3 destacou-se por apresentar a maior faixa de transição, enquanto o filtro 1 obteve a banda de rejeição mais ampla, evidenciando o impacto das variações geométricas no desempenho do filtro passa-baixa proposto.

Os resultados indicaram que modificações nos anéis externos (WMA1 e WMA2) influenciam diretamente a posição da frequência de corte e a extensão da banda de rejeição. Já os parâmetros WM1 e WM2 afetam significativamente os níveis de atenuação e a seletividade do filtro, enquanto a variação do espaçamento entre as geometrias ( $d$ ) mostrou impacto relevante no acoplamento entre os ressonadores, podendo favorecer ou

comprometer a uniformidade da resposta em frequência.

De forma geral, pode-se concluir que pequenas alterações geométricas resultam em variações expressivas no desempenho do filtro, evidenciando a necessidade de um processo de otimização cuidadoso durante o projeto. A abordagem adotada, com simulações numéricas em ambiente controlado, permitiu explorar diferentes configurações e identificar combinações que resultaram em desempenho aprimorado, com destaque para filtros que apresentaram ampla banda de rejeição, baixa perda de inserção e transições acentuadas.

## 5.2 Propostas de trabalhos futuros

Como proposta de continuidade deste trabalho, sugere-se, inicialmente, a realização de uma validação experimental, por meio da fabricação do filtro projetado e da execução de medições laboratoriais. Essa etapa permitirá a comparação entre os resultados obtidos por simulação numérica e os dados experimentais, considerando efeitos práticos como perdas de fabricação, imperfeições do substrato e variações nas dimensões físicas. Essa análise é fundamental para verificar a viabilidade do filtro em aplicações reais.

Além disso, recomenda-se a aplicação de técnicas de otimização computacional, com a utilização de algoritmos de busca e inteligência computacional. Esses métodos podem ser empregados para automatizar o ajuste dos parâmetros geométricos, visando encontrar configurações que maximizem a largura da banda de rejeição e melhorem a atenuação em faixas de frequência críticas, otimizando assim o desempenho do dispositivo de forma mais eficiente e sistemática.

## REFERÊNCIAS

- ANATEL, A. N. de T. *Espaço 5G*. 2025. <<http://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G>>. Acessado em: 25 de fevereiro de 2025.
- Ansys Inc. *Ansys Electronics Desktop Student*. 2024. Acesso em: 22 maio 2025. Disponível em: <<https://www.ansys.com/academic/students/ansys-electronics-desktop-student>>.
- BOHRA, H.; PRAJAPATI, G. Microstrip filters: A review of different filter designs used in ultrawide band technology. *Makara Journal of Technology*, v. 24, n. 2, 2020. Disponível em: <<https://scholarhub.ui.ac.id/mjt/vol24/iss2/5>>.
- BOZZI, E. et al. *Le antenne a patch come sensori per indagini non distruttive a microonde su campioni di marmo*. [S.l.], 2003. Disponível em: <[https://iris.cnr.it/retrieve/8f55c582-2bcc-47dd-bdd1-e984f3ff008a/prod\\_160147-doc\\_123688.pdf](https://iris.cnr.it/retrieve/8f55c582-2bcc-47dd-bdd1-e984f3ff008a/prod_160147-doc_123688.pdf)>.
- COSTA, J. A. da. *Desenvolvimento de filtros passa-faixa planares baseados na geometria matrioska com três camadas de metalização*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — PPGEE, IFPB, Brasil, 2024.
- ELSHEAKH, D. N. et al. Low mutual coupling  $2 \times 2$  microstrip patch array antenna by using novel shapes of defect ground structure. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 52, n. 5, p. 1208–1215, 2010.
- GARG, C.; KAUR, M. A review of defected ground structure (dgs) in microwave design. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, v. 2, n. 3, p. 1285–1290, 2014.
- Google. *Google Colaboratory*. 2023. Online; acesso em maio de 2025. <<https://colab.research.google.com>>.
- HONG, J.-S. G.; LANCASTER, M. J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- KUMAR, A.; SHARAWI, M. S.; PANDEY, G. K. A review on different techniques of mutual coupling reduction between elements of any mimo antenna. part 1: Dgss and parasitic structures. *Radio Science*, Wiley, v. 56, n. 3, p. e2020RS007122, 2021. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020RS007122>>.
- LACANETTE, K. *A Basic Introduction to Filters – Active, Passive and Switched Capacitor*. [S.l.], 1991. 22 p.
- 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.
- NETO, A. F. *Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska com Anéis Retangulares e Circulares*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — PPGEE, IFPB, Brasil, 2020.
- NETO, A. G. et al. Planar printed structures based on matryoshka geometries: A review. *Micromachines (Basel)*, v. 15, n. 4, mar. 2024.

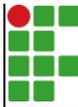
NETO, A. G. et al. A defected ground structure based on matryoshka geometry. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 21, n. 2, p. 284–293, June 2022.

OUF, E. G.; EL-HAMEED, A. S. A.; ABDALLAH, E. A. Compact lowpass filter with vast out-of-band rejection utilizing dgs. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, v. 177, p. 155207, 2024. ISSN 1434-8411. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S143484112400092X>>.

RIBEIRO, C. D. L. P. Do telégrafo ao 5g: o papel da propriedade intelectual no brasil no desenvolvimento econômicoômico e tecnológicoógico. *Rev. Jur. OAB-SC*, v. 4, n. 00, p. e039, 2024.

RIBEIRO, L. M. *Avaliação de uso de tecnologias celulares como ferramentas para melhorias de qualidade de vida de portadores de doenças crônicas*. 2019. <[https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/4ddf1614-5441-4cf4-bd78-5ce2cc329906/TCC\\_Larissa%20Medeiros%20Ribeiro%20%281%29.pdf](https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/4ddf1614-5441-4cf4-bd78-5ce2cc329906/TCC_Larissa%20Medeiros%20Ribeiro%20%281%29.pdf)>. Trabalho de Conclusão de Curso, acessado em: 26 de fevereiro de 2025.

SANTOS, D. A. *Filtros DGSs baseados na geometria matrioska*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — PPGEE, IFPB, Brasil, 2023.

	<b>INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA</b>
	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)

### Entrega do TCC de Waléska Faustino Rodrigues

<b>Assunto:</b>	Entrega do TCC de Waléska Faustino Rodrigues
<b>Assinado por:</b>	Waléska Rodrigues
<b>Tipo do Documento:</b>	Anexo
<b>Situação:</b>	Finalizado
<b>Nível de Acesso:</b>	Ostensivo (Público)
<b>Tipo do Conferência:</b>	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Waléska Faustino Rodrigues, ALUNO (20201610032) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 25/08/2025 18:16:23.

Este documento foi armazenado no SUAP em 25/08/2025. 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: 1585324

Código de Autenticação: e87b4a2f4b

