

INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

A decorative graphic consisting of a grid of rounded squares and circles. The top-left element is a pink circle. The rest of the grid is composed of light green rounded squares. The text 'MARCELLO DE ARAÚJO AIRES' is centered over the pink circle.

MARCELLO DE ARAÚJO AIRES

Estudo da Aplicação da Geometria Matrioska em Filtros DGS

João Pessoa
2022

MARCELLO DE ARAÚJO AIRES

Estudo da Aplicação da Geometria Matrioska em Filtros DGS

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: Prof. Alfredo Gomes Neto.

João Pessoa
Fevereiro, 2022

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

A298e Aires, Marcello de Araújo.

Estudo da aplicação da geometria matrioska em filtros DGS
/ Marcello de Araújo Aires. - 2022.

40 f. : il.

TCC (Graduação – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal
de Educação da Paraíba / Coordenação do Curso Superior de Ba-
charelado em Engenharia Elétrica, 2022.

Orientação : Prof. D.r Alfredo Gomes Neto.

1. Filtro em microfibra – DGS. 2. Microfibra . 3. Matrioska.
4. Ressonadores. I. Título.

CDU 621.372.852.1(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária - CRB 15/132

ATA 33/2022 - CCSBEE/UA3/UA/DDE/DG/JP/REITORIA/IFPB

Coordenação do Curso Superior de Bacharelado
em Engenharia Elétrica
CCSBEE-JP

**ATA DE APRESENTAÇÃO PÚBLICA E AVALIAÇÃO DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ATA Nº: <small>(Nº / ANO)</small>	249/2022
--------------------------------------	-----------------

Às quinze horas do dia nove do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e dois, por meio de webconferência utilizando a plataforma Google Meet no âmbito do Campus João Pessoa, foi realizada a Apresentação Pública e Avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "**ESTUDO DA APLICAÇÃO DA GEOMETRIA MATHIOSKA EM FILTROS DGS**", do aluno **MARCELLO DE ARAÚJO AIRES**, requisito obrigatório para conclusão do CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, com os membros da Banca Examinadora **ALFREDO GOMES NETO, DR.** (Orientador, IFPB), **Jefferson Costa e Silva, Dr.** (Examinador, IFPB) e **JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO, DR.** (Examinador, IFPB). Após a apresentação e as considerações da Banca Examinadora, o trabalho foi considerado **APROVADO**, com nota **80** sendo esta composta pela média aritmética das seguintes avaliações parciais:

Texto:	Apresentação:	Defesa oral:
70	90	80

Eu, **ALFREDO GOMES NETO, DR.** (Orientador, IFPB), lavrei a presente Ata, que segue assinada por mim e pelos demais membros da Banca Examinadora.

Observações:

Documento assinado eletronicamente por:

- Cleumar da Silva Moreira, COORDENADOR DE CURSO - FUC1 - CCSBEE-JP em 30/03/2022 12:30:05.
- Joabson Nogueira de Carvalho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/03/2022 14:06:04.
- Alfredo Gomes Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/03/2022 15:42:05.
- Jefferson Costa e Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 31/03/2022 17:03:45.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/03/2022. 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: 278829
Verificador: 4f556b546b
Código de Autenticação:



Agradecimentos

À minha mãe, meu pai, minha irmã e minha avó, que sempre me deram imenso suporte em todas as fases da minha vida, sempre me incentivando a continuar por esta jornada.

À minha namorada Letícia, que surgiu como um anjo em minha vida e me ajudou profundamente em diversos momentos de dificuldade.

Aos meus grandes amigos, que conheci durante o curso e na vida, que sempre me aceitaram da maneira que sou e a todo o momento estiveram ao meu lado quando mais precisei.

Aos professores do IFPB, por todo conhecimento que me foi passado, em especial a Alfredo Gomes Neto, pela assistência que me foi dada durante toda a trajetória do curso e principalmente pela sua paciência e generosidade.

E a Deus, pela vida, e por me permitir ultrapassar todos os empecilhos encontrados ao longo da minha vida.

*“I feel like people are
expecting me to fail;
therefore, I expect
myself to win.”
(Lewis Hamilton)*

RESUMO

Os filtros são elementos fundamentais em sistemas de telecomunicações. Com o progresso tecnológico e o aumento da demanda pelos serviços de telecomunicações, o desenvolvimento de equipamentos cada vez menores e eficientes é incentivado cada vez mais. Em vista disso, neste trabalho é apresentada a análise numérica de filtros planares, com estruturas DGS baseadas na geometria matrioska. São apresentados então os resultados numéricos de quatro filtros DGS com geometrias matrioska de tamanhos variados juntamente com suas equações de projeto iniciais, mostrando suas respostas em frequências e comparando ambos os valores obtidos numericamente e calculados através destas equações.

Palavras-chave: DGS, filtros em microfita, matrioskas, ressonadores.

ABSTRACT

Filters are fundamental elements in telecommunication systems. With technological progress and the increasing demand for these telecommunications services, the development of smaller and more efficient equipment is more and more encouraged. Accordingly, this work presents numerical analysis of planar filters with matrioska geometry imprinted on their ground plane. The numerical results of four DGS filters with matrioska geometries of varying sizes are then presented alongside with their initial design equations, showing their frequency responses and comparing the values obtained both numerically and calculated through these equations.

Keywords: *DGS, microstrip filters, matrioska, resonators.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de filtragem em um sinal.	12
Figura 2 – Exemplo de DGS.	13
Figura 3 – Exemplo de geometria matrioska com 4 anéis e sua expansão.	14
Figura 4 – Resposta em frequência de um filtro passa-baixa e seu diagrama de blocos.	16
Figura 5 – Circuito básico de um filtro passa-baixa.	16
Figura 6 – Resposta em frequência de um filtro passa-alta e seu diagrama de blocos.	17
Figura 7 – Circuito básico de filtro passa-alta.	17
Figura 8 – Resposta em frequência de um filtro passa-faixa e seu diagrama de blocos.	18
Figura 9 – Circuito básico de filtro passa-faixa.	18
Figura 10 – Resposta em frequência de um filtro rejeita-faixa e seu Diagrama de Blocos.	19
Figura 11 – Circuito básico de filtro rejeita-faixa.	20
Figura 12 – Parâmetros de faixas de frequência de um filtro passa-baixa.	22
Figura 13 – Exemplos de componentes concentrados utilizados nos filtros.	23
Figura 14 – Exemplo de filtro passa-faixa em guia de ondas.	23
Figura 15 – Modelo de uma estrutura com linha de fita.	24
Figura 16 – Modelo de uma estrutura com microfita.	25
Figura 17 – Dimensões relevantes de uma estrutura de microfita.	25
Figura 18 – Exemplo de descontinuidades e seus circuitos equivalentes.	27
Figura 19 – Exemplo de ressonadores.	28
Figura 20 – Unidade DGS Halter.	29
Figura 21 – Exemplos de Geometrias de DGS: (a) Espiral, (b) Arrowhead, (c) H, (d) Quadrado de laço aberto, (e) Halter de laço aberto e (f) Interdigital.	29
Figura 22 – Exemplo de matrioska.	30
Figura 23 – Comprimento final da matrioska.	30
Figura 24 – Filtro DGS baseada na geometria matrioska escolhida.	31
Figura 25 – Geometria de matrioska escolhida.	32
Figura 26 – Resposta em frequência do filtro DGS1.	33
Figura 27 – Resposta em frequência do filtro DGS2.	34
Figura 28 – Resposta em frequência do filtro DGS3.	35
Figura 29 – Resposta em frequência do filtro DGS4.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões das quatro geometrias matrioska utilizadas.	32
Tabela 2 – Características observadas para a resposta em frequência dos filtros.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RF	Radiofrequência
DGS	<i>Deflected Ground Structure</i>
Vin	Tensão de Entrada
Vout	Tensão de Saída
R	Resistor/Resistência
L	Indutor/Indutância
C	Capacitor/Capacitância
S21	Módulo de Coeficiente de Transmissão

Sumário

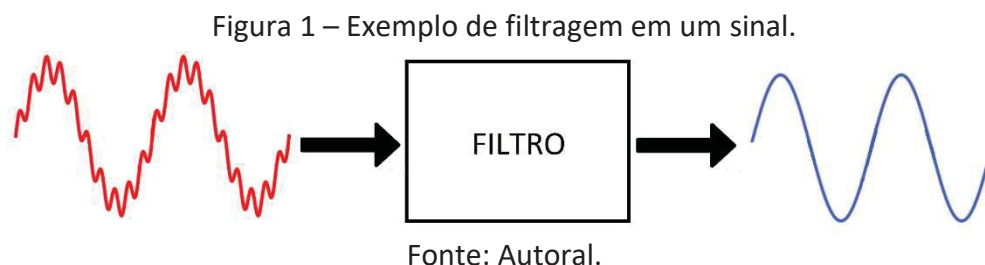
1 Introdução	12
1.1 Objetivo.....	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
2 Fundamentação Teórica	15
2.1 Filtros	15
2.1.1 Resposta em Frequência dos Filtros.....	15
2.1.1.1 Filtro Passa-Baixa	15
2.1.1.2 Filtro Passa-Alta	16
2.1.1.3 Filtro Passa-Faixa	17
2.1.1.4 Filtro Rejeita-Faixa	19
2.1.2 Parâmetros Importantes	20
2.1.3 Filtros Ativos	22
2.1.4 Filtros Digitais	22
2.1.5 Filtro de micro-ondas.....	22
2.2 Microfita	24
2.2.1 Parâmetros da Linha de Microfita	25
2.2.2 Descontinuidades	26
2.2.3 Ressonadores.....	27
2.3 Defected Ground Structure	28
2.4 Matrioska	29
3 Resultados	31
3.1 Caracterização Numérica.....	31
4 Conclusões.....	37

1 Introdução

Comunicação é o processo de troca de informações e a humanidade vivencia a era da tecnologia da informação. Seres humanos se comunicam para expressar sentimentos, ideias e pensamentos para outros, sendo uma característica inerente à vida humana e incluem linguagens verbais, não verbais e processos eletrônicos. Formas já conhecidas de comunicação eletrônica como telefone, rádio, TV e a Internet, aumentaram consideravelmente as habilidades de compartilhar informações e o sucesso da vida profissional e pessoal está diretamente relacionado ao quão bem se tem a capacidade de se comunicar [1].

Esta necessidade natural de manter-se informado impacta cada vez mais a sociedade como um todo. Tecnologias *Wireless* e *Smartphones* estão em grande crescente. Segundo estudo coordenado pelo professor da FGV EAESP, Fernando Meirelles, em 2021 o Brasil contava com mais de 234 milhões de *Smartphones*, mais de 1 por habitante brasileiro [2]. Mais da metade da população mundial encontra-se *online* e quase toda a população mundial vive no alcance de um sinal de telefonia móvel [3].

O espectro de frequências usado para comunicações é um recurso precioso e limitado. O aumento de demanda principalmente de serviços de Internet está tornando este espectro cada vez mais restrito [4]. Com estas restrições, pesquisadores constantemente buscam ferramentas para selecionar e processar da melhor maneira os sinais recebidos nos sistemas de comunicação. Neste sentido, um dos requisitos, é separar os sinais desejados dos indesejados, o que pode ser feito utilizando filtros, que são circuitos seletores de frequência. Filtros são projetados para permitirem passagem de certas frequências e rejeitar outras [1]. A Figura 1 mostra um exemplo de filtragem em um sinal.

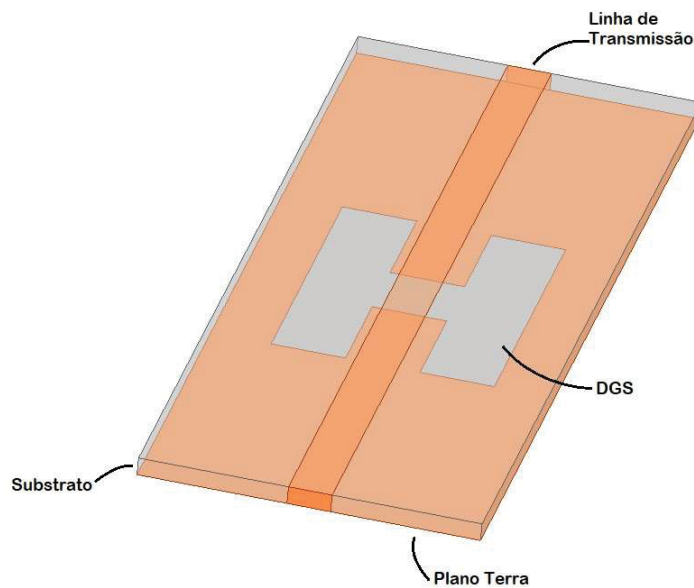


Filtros também possuem um papel importante em muitas aplicações de RF (Rádiofrequência) ou micro-ondas. Estes filtros de RF/micro-ondas estão sendo, a cada dia que passa, projetados para que possuam uma melhor performance, menor tamanho, menos peso

e custo reduzido. Estas exigências estimulam de forma significativa o desenvolvimento de filtros de RF/Micro-ondas em estruturas planares, especialmente em microfita [5].

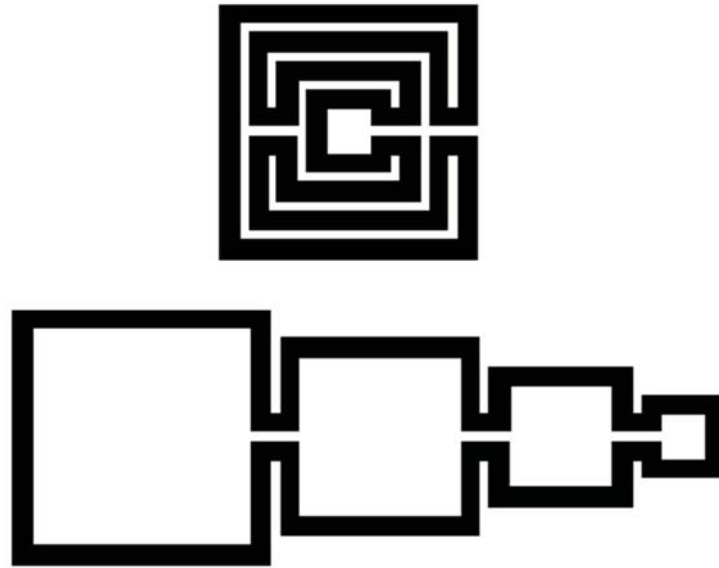
Uma das técnicas utilizadas para atingir as especificações dos filtros é a remoção de uma parte do plano de terra dos circuitos de microfita, sendo esta técnica denominada DGS (*Defected Ground Structure*), Figura 2. A remoção dessa parte do plano de terra, de acordo com a sua geometria, causa distúrbios na distribuição de corrente no plano de terra, alterando características da linha de transmissão (microfita) [6]. Estas alterações, quando utilizadas de maneira adequada, aumentam ainda mais a eficiência dos filtros [7]. A geometria da parte removida do plano de terra é um dos parâmetros mais flexíveis no projeto de filtros utilizando DGS. Neste contexto, este trabalho apresenta aplicações da geometria matrioska em estruturas DGS. A geometria matrioska consiste em anéis concêntricos, porém interconectados, aumentando seu comprimento efetivo (Figura 3) [8].

Figura 2 – Exemplo de DGS.



Fonte: Autoral.

Figura 3 – Exemplo de geometria matrioska com 4 anéis e sua expansão.



Fonte: Autoral.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a utilização da geometria matrioska em estruturas DGS.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- i) Revisar a bibliografia relativa ao TCC;
- ii) Compreender os conceitos básicos da geometria matrioska;
- iii) Assimilar os princípios de projeto de estruturas DGS;
- iv) Projetar e caracterizar numericamente filtros utilizando estruturas DGS baseadas na geometria matrioska;
- v) Documentar os resultados obtidos por meio da elaboração e defesa deste TCC.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Filtros

Filtragem é uma das formas mais comuns de processamento da informação, empregada para remover certas faixas de frequência de um sinal, modificando a sua amplitude e/ou fase. Filtros mais simples podem ser fabricados utilizando resistores e, capacitores e/ou indutores. Estes filtros são chamados de filtros passivos pois utilizam apenas componente passivos (resistores (R), capacitores (C) e indutores (L)) que não amplificam sinais [10]. Na área de comunicação, muitos filtros passivos são utilizados, mas vários outros tipos também são aplicados. Filtros ativos que utilizam circuitos RC com amplificadores operacionais, filtros de capacitores chaveados, filtros de cerâmica e cristal, filtros de onda acústica de superfície e filtros digitais aplicados em PDS (Processamento Digital de Sinais) são alguns exemplos [1].

Nos filtros, entre outros parâmetros, é possível destacar as frequências de corte (F_c) e frequência de ressonância (F_r). A frequência de corte é aquela em que a potência de saída do sinal apresenta metade ($-3dB$) do seu valor máximo possível. Em termos de tensão, a queda de $3dB$ na potência de saída corresponde à aproximadamente 70,7% da tensão máxima de saída. Já a frequência de ressonância é a frequência na qual o circuito obtém a melhor resposta do sinal de saída, considerando a necessidade de passagem ou rejeição do sinal de entrada [10].

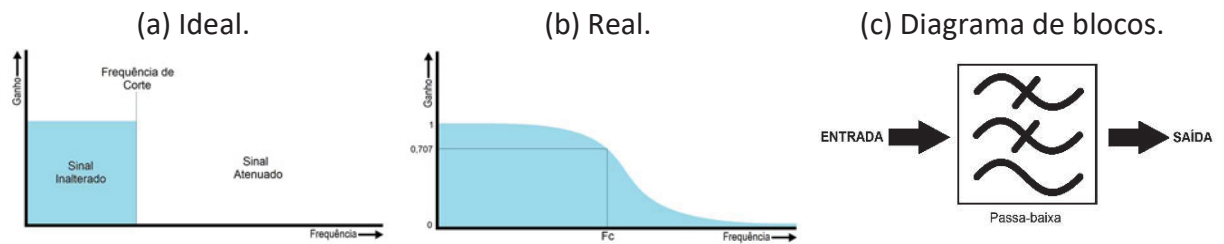
2.1.1 Resposta em Frequência dos Filtros

Os filtros podem ser classificados de diferentes formas, entre elas pela sua resposta em frequência. A seguir são apresentadas as principais classificações dos filtros pela sua resposta em frequência.

2.1.1.1 Filtro Passa-Baixa

Um filtro passa-baixa faz com que os sinais de frequência acima da frequência de corte (F_c) sejam atenuados, permitindo passagem dos sinais com frequências inferiores. A resposta em frequência (ganho em relação à frequência) ideal deste filtro está exemplificada na Figura 3.a. Esta resposta em frequência não pode ser observada em aplicações reais. Em circuitos aplicados na prática, a transição na frequência de corte não é tão acentuada, mas ocorre de maneira gradual, desde uma pequena atenuação até a atenuação máxima do sinal (Figura 3.b). A Figura 3.c ilustra sua simbologia usual [1].

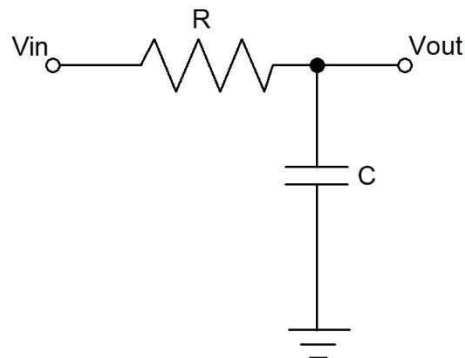
Figura 4 – Resposta em frequência de um filtro passa-baixa e seu diagrama de blocos.



Fonte: Autoral.

O projeto mais simples para o circuito de um filtro passa-baixa é exemplificado na Figura 5. Basicamente, um divisor de tensão entre um resistor e um capacitor. A reatância do capacitor é inversamente proporcional à frequência do sinal, isto resulta em uma reatância maior com uma baixa frequência, fazendo com que a maior parte da tensão aplicada na entrada esteja presente na saída do circuito [10].

Figura 5 – Circuito básico de um filtro passa-baixa.



Fonte: Autoral.

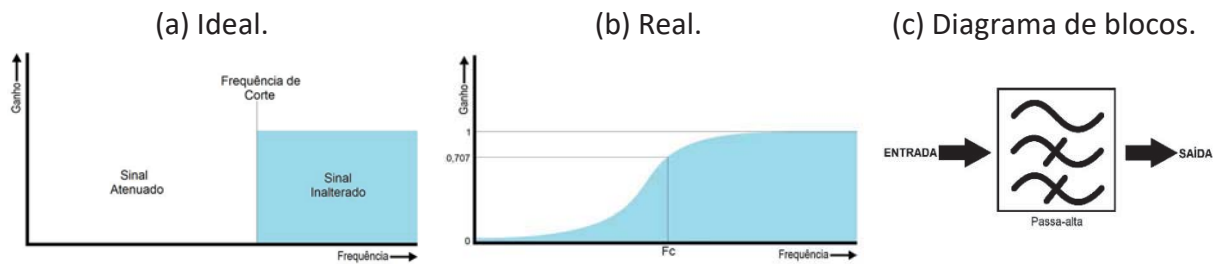
A frequência de corte deste filtro é determinada pela expressão:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.1)$$

2.1.1.2 Filtro Passa-Alta

Ao contrário do filtro passa-baixa, o filtro passa-alta age atenuando frequências abaixo da frequência de corte projetada, permitindo passagem dos sinais com frequências superiores. A Figura 5 ilustra o comportamento ideal e o real da resposta em frequência deste filtro e sua simbologia usual [1].

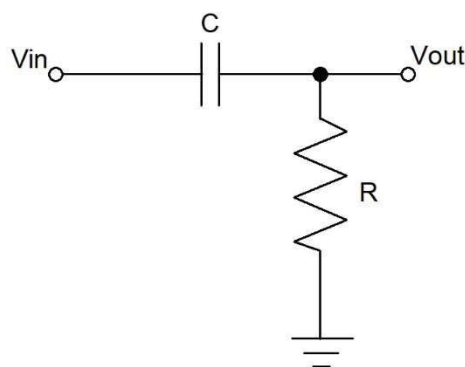
Figura 6– Resposta em frequência de um filtro passa-alta e seu diagrama de blocos.



Fonte: Autoral.

O projeto mais simples para implementação de um filtro passa-alta é apresentado na Figura 7. O circuito é apenas o inverso do circuito de um filtro passa-baixa, com o capacitor na entrada no sistema e a tensão de saída sendo a tensão presente no resistor. Conforme a frequência do sinal de entrada vai aumentando, a reatância do capacitor vai diminuindo, se comportando cada vez mais como um fio, conseqüentemente, a tensão ficará quase que por completa na carga resistiva de saída [1], [10]. A frequência de corte também é determinada pela expressão 2.1.

Figura 7 – Circuito básico de filtro passa-alta.

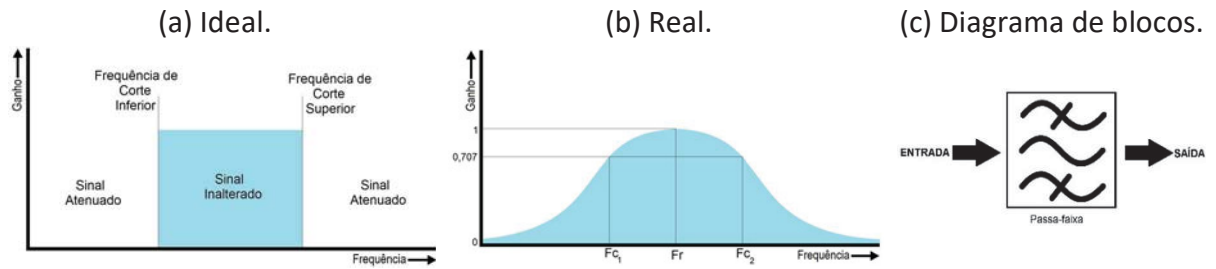


Fonte: Autoral.

2.1.1.3 Filtro Passa-Faixa

O filtro passa-faixa realiza ambas as funções dos filtros passa-baixa e passa-alta. A finalidade deste filtro é a de tanto atenuar frequências abaixo da frequência de corte inferior (F_{c1}) e atenuar frequências acima da frequência de corte superior (F_{c2}). A frequência em que a atenuação é mínima é a frequência de ressonância (F_r) [1], [10]. A Figura 8 ilustra a resposta em frequência ideal e real para este filtro e sua simbologia usual.

Figura 8 – Resposta em frequência de um filtro passa-faixa e seu diagrama de blocos.

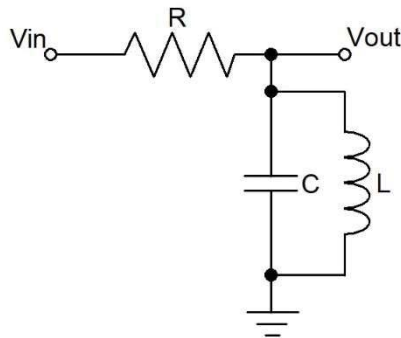


Fonte: Autoral.

Um dos circuitos mais simples para obtenção de um filtro passa-faixa é o circuito RLC apresentado na Figura 9. Ao contrário da reatância do capacitor, a reatância do indutor é diretamente proporcional à frequência aplicada neste componente. Estas características quando combinadas, podem ser utilizadas para permitirem passagem das frequências dentro de uma determinada faixa.

Com uma baixa frequência, o capacitor se comporta como um circuito aberto, porém o indutor apresenta o comportamento de um circuito fechado, fazendo assim a maior parcela da tensão de entrada recair sobre o resistor. Com uma alta frequência, ocorre o oposto, o capacitor se comporta como um circuito fechado e o indutor como um circuito aberto, novamente fazendo a maior parcela da tensão de entrada recair sobre o resistor. Entretanto, em frequências intermediárias próximas à frequência de ressonância do circuito, tanto o capacitor quanto o indutor apresentarão alta reatância, fazendo com que a maior parte da tensão de entrada esteja presente no circuito LC paralelo de saída [1], [10].

Figura 9 – Circuito básico de filtro passa-faixa.



Fonte: Autoral.

A frequência de ressonância do circuito é dada pela equação:

$$Fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.2)$$

Já as frequências de corte superior e inferior (FC_1 e FC_2) são dadas pelas equações:

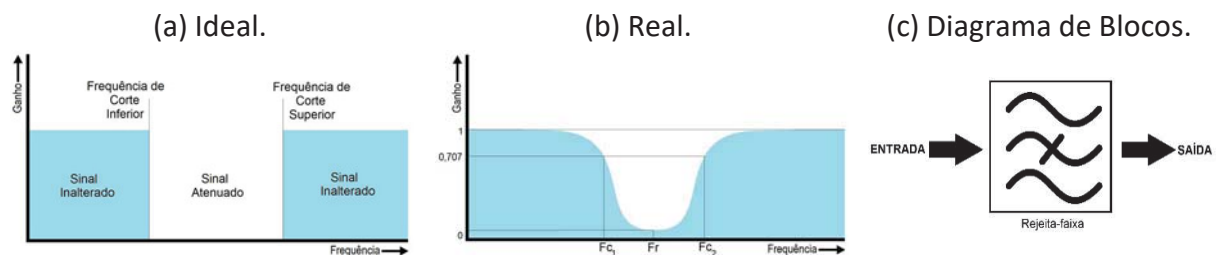
$$FC_1 = \frac{-\frac{L}{R} + \sqrt{\frac{L^2}{R^2} + 4LC}}{2LC} \quad (2.3)$$

$$FC_2 = \frac{\frac{L}{R} + \sqrt{\frac{L^2}{R^2} + 4LC}}{2LC} \quad (2.4)$$

2.1.1.4 Filtro Rejeita-Faixa

O filtro rejeita-faixa demonstra um comportamento oposto ao do filtro passa-faixa. No rejeita-faixa, o propósito é o de atenuar apenas frequências dentro da região entre as frequências de corte inferior e superior (FC_1 e FC_2), com atenuação máxima ocorrendo na frequência de ressonância (Fr). Nas frequências fora da faixa de atenuação, o sinal presente na saída é, na teoria, o mesmo sinal presente na entrada [1] [10]. A Figura 10 ilustra as respostas em frequência ideal e real de um filtro rejeita-faixa e sua simbologia usual.

Figura 10 – Resposta em frequência de um filtro rejeita-faixa e seu Diagrama de Blocos.



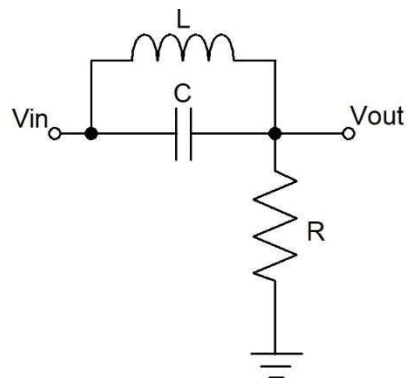
Fonte: Autoral.

Um dos projetos mais básicos para a construção de um filtro rejeita-faixa está exemplificado na Figura 11. O circuito é o inverso do filtro passa-faixa, com o resistor como carga de saída do sistema.

Em sinais com baixas frequências, o capacitor irá apresentar características de um circuito aberto e o indutor o de um curto-circuito, fazendo com que a maior parte da tensão recaia sobre o resistor de saída. Em sinais com frequências mais altas, o capacitor apresenta características de um curto-circuito e o indutor tende agora a um circuito aberto, fazendo com

que, novamente, a maior parcela da tensão recai sobre o resistor de saída. Já para frequências intermediárias, que estejam em uma faixa próxima à frequência de ressonância do sistema, o circuito LC juntos apresentarão alta reatância, fazendo com que a tensão fique “presa” nestes dois componentes [1] [10]. As frequências de corte e de ressonância são dadas também pelas expressões: 2.2, 2.3 e 2.4.

Figura 11 – Circuito básico de filtro rejeita-faixa.



Fonte: Autoral.

2.1.2 Parâmetros Importantes

Além da frequência de corte e da frequência de ressonância, outros parâmetros são considerados na análise dos filtros. Alguns desses parâmetros são citados a seguir.

A largura de banda, do inglês *Bandwidth* (BW), consiste meramente na diferença entre as frequências de corte superior e inferior, $BW = F_{c2} - F_{c1}$, e informa a capacidade, em frequência (Hz), do filtro de rejeitar ou permitir passagem do sinal usualmente em até meia potência ($-3dB$). No caso de filtros passa-baixa, a largura de banda é dada apenas pela sua única frequência de corte [11].

A faixa de transição é a região encontrada entre a faixa de passagem e a faixa de rejeição na resposta em frequência de determinado filtro. Usualmente, um filtro que possui uma faixa de transição estreita, ou seja, mais íngreme, é considerado mais eficiente [12].

A razão entre a amplitude da tensão refletida (V_r) com a amplitude da tensão incidente (V_i) é dada pelo coeficiente de reflexão, Γ ,

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.5)$$

A medida que relaciona as potências refletida e de entrada em uma linha de transmissão é a perda de retorno (RL, *Return Loss*) definida por:

$$RL = 20\log|\Gamma|dB \quad (2.6)$$

Quando o $\Gamma = 0$, o valor para a perda de retorno é de ∞ dB, ou seja, não há potência refletida, entretanto, com uma reflexão total, $\Gamma = 1$, a perda de retorno é 0dB, toda a potência incidente teve reflexão [13]. *Return loss* também pode ser definida em termos de potência por:

$$RL = 10\log\frac{P_r}{P_i} dB \quad (2.7)$$

O coeficiente de transmissão é a relação entre a amplitude da tensão transmitida (V_t) e a amplitude da tensão incidente, T ,

$$T = \frac{V_t}{V_i} \quad (2.8)$$

A medida que relaciona as potências transmitidas e de entrada na linha de transmissão é a perda de inserção (IL, *Insertion Loss*) definida por:

$$IL = 20\log|T|dB \quad (2.9)$$

Com $T = 1$, ou seja, toda a potência foi transmitida, o valor para a perda de inserção é de 0dB, porém, com $T = 0$, não há potência de transmissão, logo a perda de inserção é de ∞ dB [13].

Insertion loss também pode ser definida em termos de potência por:

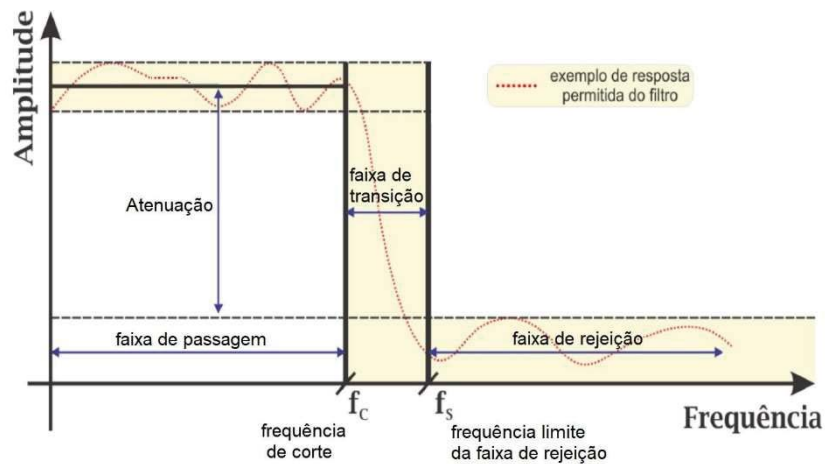
$$IL = 10\log\frac{P_t}{P_i} dB \quad (2.10)$$

A atenuação se trata do ganho de sinal dentro da faixa de passagem do filtro. Normalmente, uma atenuação mínima é definida para o projeto do circuito, de forma que a funcionalidade do filtro não seja prejudicada [15], [16].

Alguns filtros podem apresentar ondulações na resposta em frequência tanto na faixa de passagem quanto na faixa de rejeição, essas ondulações são chamadas de *ripple* [15].

A Figura 12 resume de forma gráfica alguns dos parâmetros principais de faixas de frequência de um filtro passa-baixa.

Figura 12 – Parâmetros de faixas de frequência de um filtro passa-baixa.



Fonte: [14].

2.1.3 Filtros Ativos

Filtros ativos utilizam elementos amplificadores, principalmente amplificadores operacionais, com resistores e capacitores nos circuitos de realimentação, possibilitando caracterização do filtro desejado. Um dos fatores mais importantes para estes filtros é a possibilidade de projetar filtros sem indutores, conseqüentemente reduzindo os problemas associados a este elemento [15].

2.1.4 Filtros Digitais

São filtros programáveis via *softwares*, com vantagens como não dependerem das características de componente analógicos. Normalmente funcionando entre dois conversores, um analógico-digital na entrada e um digital-analógico na saída. Uma maior precisão pode ser obtida com o acréscimo do número de bits na amostragem do sinal de entrada e nos coeficientes do filtro [9], [17].

2.1.5 Filtro de micro-ondas

Sistemas com elementos concentrados, Figura 13, funcionam bem para frequências até a casa de centenas Megahertz. Após esta faixa, estes componentes se tornam impraticáveis. Em aplicações de baixa potência, microfritas são bastante utilizadas. Para maiores potências, considera-se o uso de guia de ondas, Figura 14 [12].

Figura 13 – Exemplos de componentes concentrados utilizados nos filtros.



Figura 14 – Exemplo de filtro passa-faixa em guia de ondas.



Fonte: [18], [19].

Filtros com ressonadores de microfita são bastante utilizados na faixa de micro-ondas devido às vantagens como tamanho, peso e custo, mesmo possuindo desvantagens como um menor fator de qualidade e maiores perdas de inserção quando comparados aos filtros em guia de ondas. Projetos nessa área buscam reduzir ainda mais as dimensões, o custo e o peso de novos filtros [16].

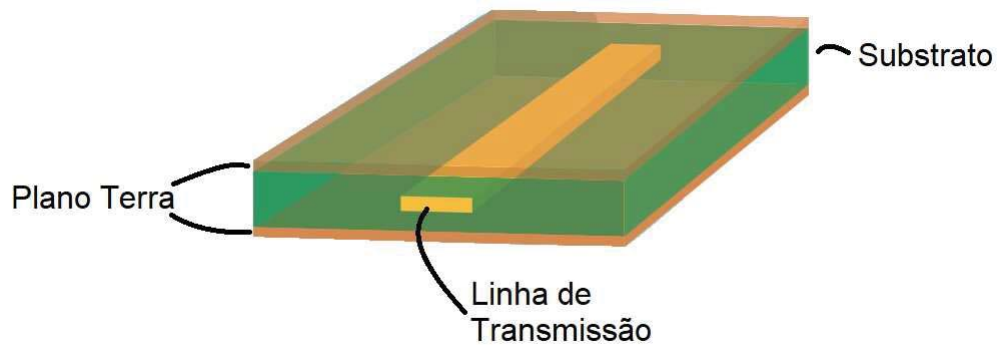
Em geral, quando se realiza um projeto de filtro RF, elabora-se antes um projeto de filtro com elementos concentrados, escolhendo as especificações. O próximo passo é então implementar uma geometria de microfita que se aproxime do comportamento do filtro de elementos concentrados [6], [20].

2.2 Microfita

Nos anos seguintes após a Segunda Guerra Mundial (1945), guias de onda retangulares eram as estruturas de guia de onda dominantes. Porém, pesquisadores continuaram em busca de componentes com potencial de disponibilizar uma maior largura de banda. Cabos coaxiais poderiam ser utilizados, já que possuíam capacidade para miniaturização e uma maior largura de banda, porém, eram mais caros de fabricar [21].

Em tentativas de superar esse desafio, o condutor central do cabo coaxial foi achatado em uma fita e o condutor externo foi alterado para uma caixa retangular. Pouco tempo depois, foram removidas as paredes laterais e estendidas as paredes superiores e inferiores do dielétrico. O resultado destas alterações deu o surgimento das linhas de fita, ou *stripline* (Figura 15), [21].

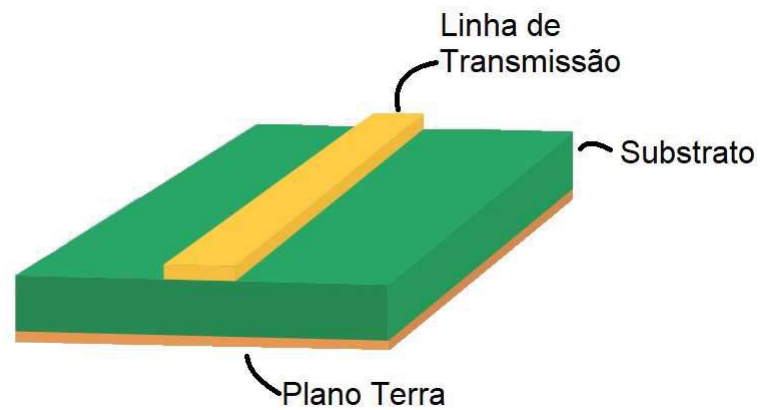
Figura 15 – Modelo de uma estrutura com linha de fita.



Fonte: [22].

Outra modificação que surgiu foi a remoção da camada superior do dielétrico, resultando na permanência apenas da fita condutora e da camada inferior, com um substrato entre elas. Esta estrutura foi nomeada microfita, ou *microstrip* (Figura 16), [21].

Figura 16 – Modelo de uma estrutura com microfita.

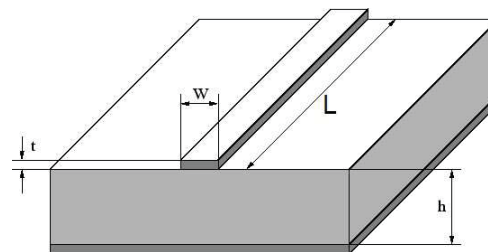


Fonte: [22].

2.2.1 Parâmetros da Linha de Microfita

A microfita é um tipo de linha de transmissão planar que possui uma fita condutora de largura W e espessura t na parte superior de um substrato dielétrico com uma constante dielétrica relativa ϵ_r e uma espessura h . Abaixo deste substrato existe um plano de terra, superfície condutora, como exemplificada na Figura 17 [6], [20].

Figura 17 – Dimensões relevantes de uma estrutura de microfita.



Fonte: [23].

Como visto anteriormente, em baixas frequências, estruturas ressonantes são compostas por elementos concentrados (*lumped elements*), como resistores, capacitores e indutores. Conforme a frequência de operação aumenta, elementos concentrados não podem mais ser utilizados, pois a dimensão do circuito se torna similar ao comprimento de onda, neste caso são considerados elementos distribuídos. Em frequências de micro-ondas, cavidades ressonantes e microfita são usualmente aplicadas [24].

Como a estrutura da microfita não é homogênea, devido à presença do ar acima e do substrato dielétrico abaixo da fita, as componentes dos campos elétricos e magnéticos longitudinais estarão presentes, logo, uma onda eletromagnética transversal (TEM, *Transverse Electromagnetic*) pura não é possível [6], [24].

Porém, como as componentes longitudinais dos campos são bem menores do que as componentes transversais, elas podem ser ignoradas. Logo, o modo dominante da microfita pode ser aproximado para o modo TEM, e as teorias de transmissão TEM podem ser aplicadas às microfitas também. Esta aproximação é chamada de quasi-TEM e é válida para a maior parte das frequências de operação da microfita [6].

Na aproximação quasi-TEM, o meio não-homogêneo dielétrico-ar da microfita é substituído por um meio homogêneo com uma permissividade dielétrica efetiva. Para obtenção dos parâmetros característicos da linha de transmissão, constante dielétrica efetiva (ϵ_{ref}) e impedância característica (Z_c), assume-se o modo de propagação de onda na microfita como sendo TEM pura [6].

Constante dielétrica efetiva pode ser dada por [6]:

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{u}\right)^{-a} \quad (2.11)$$

Onde ϵ_r é a constante dielétrica do substrato, $u = \frac{W}{h}$ e

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left(\frac{u^4 + \left(\frac{u}{52}\right)^2}{u^4 + 0,432} \right) + \frac{1}{18,7} \ln \left[1 + \left(\frac{u}{18,1} \right)^3 \right] \quad (2.12)$$

$$b = 0,564 \left(\frac{\epsilon_r - 0,9}{\epsilon_r + 3} \right) \quad (2.13)$$

A impedância característica pode ser dada por [6]:

$$Z_c = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_{ref}}} \ln \left[\frac{F}{u} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{u}\right)^2} \right] \quad (2.14)$$

Onde $\eta = 120\pi \text{ ohms}$ e

$$F = 6 + (2\pi - 6)e^{-\left(\frac{30,666}{u}\right)^{0,7528}} \quad (2.15)$$

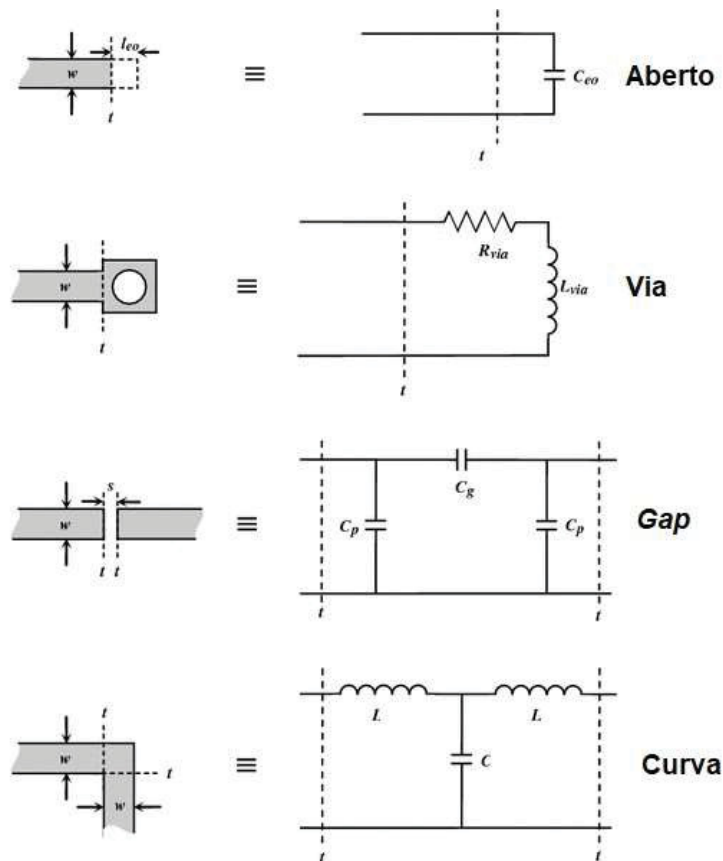
2.2.2 Descontinuidades

Descontinuidades estão presentes em todos os circuitos distribuídos práticos. Quando são utilizadas em frequências abaixo de 2 GHz, com o comprimento físico do circuito muito menor que o comprimento de onda guiado ($L \ll \lambda_g$), são normalmente desconsideradas, pois

ocasionam baixas capacitâncias e indutâncias. Porém, as reatâncias se tornam significativas conforme os comprimentos de onda diminuem. A descontinuidade é causada por uma mudança súbita na geometria da microfita, fazendo com que a distribuição de campos elétricos e magnéticos sejam modificados nas proximidades da descontinuidade [20], [25].

A Figura 18 ilustra algumas estruturas típicas de descontinuidades e seus circuitos equivalentes. Quando apropriado, expressões de forma fechada dos modelos equivalentes desses circuitos podem ser úteis [6].

Figura 18 – Exemplo de descontinuidades e seus circuitos equivalentes.



Fonte: [26].

2.2.3 Ressonadores

Um ressonador de microfita é qualquer estrutura capaz de conter pelo menos um campo eletromagnético oscilante. Há diversas geometrias diferentes que podem ser utilizadas conforme as características desejadas. Estas geometrias podem ser classificadas em concentradas, quase concentradas, em linha e em *patch*, Figura 19 [6].

Figura 19 – Exemplo de ressonadores.

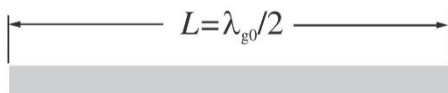
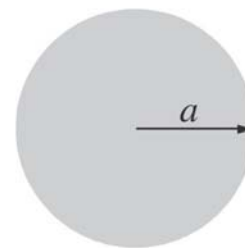
(a) Concentrado.



(b) Quase concentrado.



(c) Em linha.

(d) Em *patch* circular.

Fonte: [6].

A variação de geometrias junto com as discontinuidades resulta em diferentes comportamentos da propagação do sinal. A escolha dos diferentes ressonadores irá depender das técnicas de fabricação disponíveis e da resposta em frequência desejada [27].

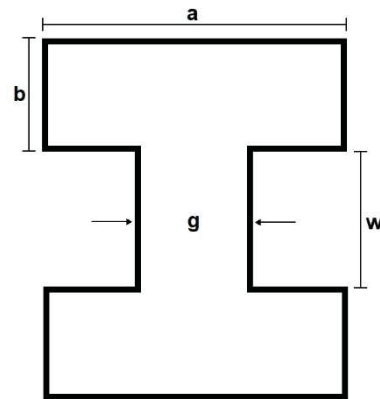
2.3 Defected Ground Structure

Defected Ground Structure, ou DGS, é uma cavidade periódica ou não-periódica no plano de terra de uma linha de transmissão planar. Esta cavidade causa um distúrbio na distribuição de corrente no plano de terra, alterando as características da linha de transmissão, como a capacitância e indutância [28], [29].

Quando comparada com outras estruturas, como o PBG (*Photonic Band Gap*), a DGS é mais simples de projetar e implementar e tem uma maior precisão nas estruturas mais usuais [5].

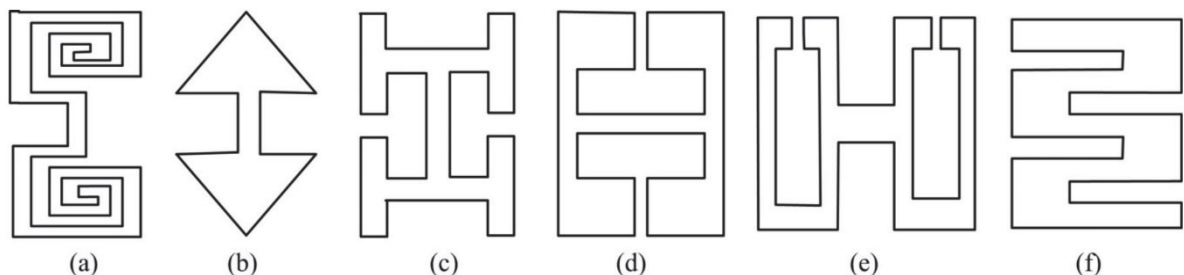
A primeira e mais básica estrutura de DGS é o DGS Halter (*DGS dumbbell*), que é formada por dois retângulos de lados $a \times b$ e uma lacuna $g \times w$, como exemplificada na Figura 20 [7].

Figura 20 – Unidade DGS Halter.



Fonte: Autoral.

Diversas geometrias de DGS já foram apresentadas na literatura, como a DGS em espiral quadrada [30], a DGS espiral [31], a DGS *Arrowhead* (Cabeça de Flecha) [32], a DGS Cruz [33] e a DGS H [34]. A Figura 21 ilustra algumas geometrias de DGS.

Figura 21 – Exemplos de Geometrias de DGS: (a) Espiral, (b) *Arrowhead*, (c) H, (d) Quadrado de laço aberto, (e) Halter de laço aberto e (f) Interdigital.

Fonte: [28]

Cada DGS possui características distintas dependendo de sua geometria. Com a alteração da capacitância e indutância da microfita, a DGS proporciona uma banda de rejeição para certas frequências e também causa um efeito *slow-wave*, que ajuda a reduzir o tamanho dos circuitos. Quando aplicada ao plano de terra de filtros, a DGS provoca algumas melhorias, como supressão de harmônicas de ordem superior, maior banda de rejeição, faixa de transição mais íngreme e melhora nas características da banda passante e de rejeição [5].

2.4 Matrioska

Matrioskas são conhecidas como “boneca russa”, um brinquedo tradicional da Rússia. O brinquedo é formado por um conjunto de bonecas, que são colocadas umas dentro das outras, indo da maior boneca até a menor, como mostrado na Figura 22 [35].

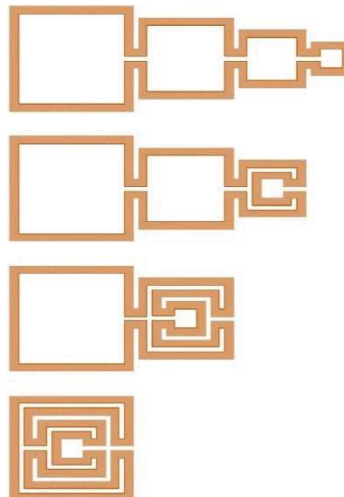
Figura 22 – Exemplo de matrioska.



Fonte: [36].

Esta característica da matrioska é aplicada na microfita. A geometria matrioska permite o aumento do comprimento efetivo, porém mantendo a área ocupada limitada à área do anel mais externo. Os anéis da geometria matrioska são interligados, aumentando seu comprimento efetivo e, conseqüentemente diminuindo a frequência de ressonância, Figura 23 [37].

Figura 23 – Comprimento final da matrioska.



Fonte: [8].

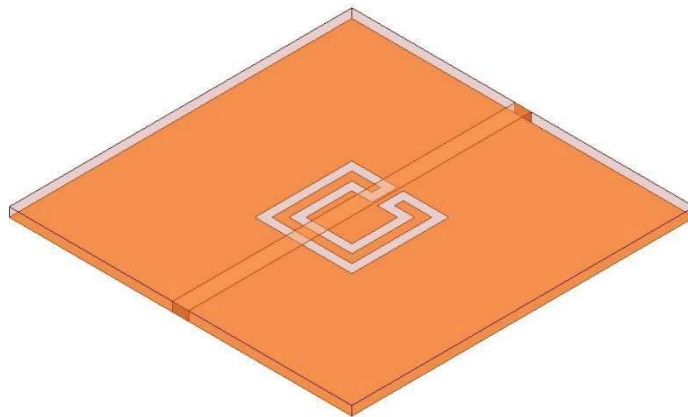
À medida que o número de anéis aumenta, a complexidade do circuito equivalente também aumenta, fazendo com que a obtenção das equações dos circuitos seja impraticável. Devido a este motivo, a aplicação de métodos numéricos é necessária [8]. Entretanto, algumas equações iniciais de projeto já estão disponíveis [16], [38];

3 Resultados

3.1 Caracterização Numérica

Foram construídos quatro modelos de filtros com geometrias matrioskas diferentes como DGS. O anel de matrioska é centralizado abaixo da microfita e sua geometria é então retirada do plano de terra, como exemplificado na Figura 24. A caracterização numérica destes filtros foi realizada utilizando o *software* comercial ANSYS HFSS 2020 [39].

Figura 24 – Filtro DGS baseada na geometria matrioska escolhida.



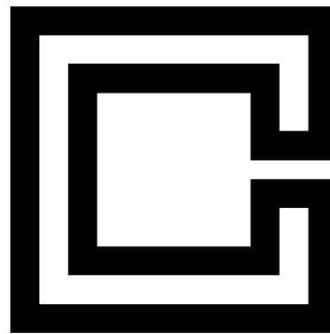
Fonte: Autoral.

Os filtros foram modelados para simulação em um substrato de FR-4 (constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $tg(\delta) = 0,02$), com 60 x 60 mm de dimensão e espessura h de 1,6 mm. A linha de transmissão deste filtro possui uma largura w de 2,8 mm. As portas 1 e 2 possuem uma impedância característica de 50Ω e a distância entre estas duas portas é a mesma da largura do substrato, 60 mm.

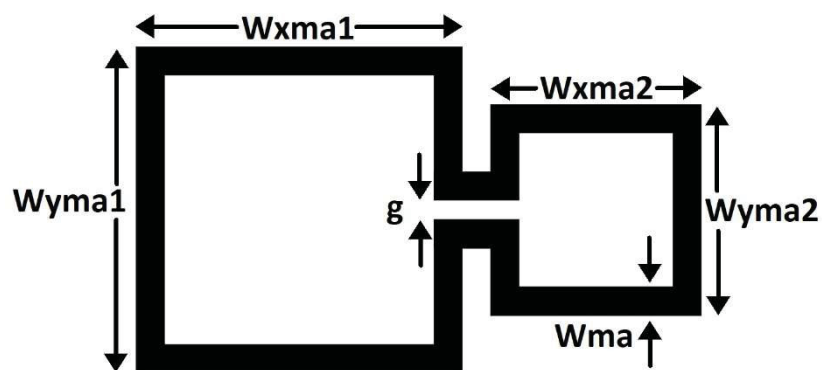
A estrutura foi inserida em uma caixa de aproximadamente 130 x 130 x 70 mm, definida como fronteira de radiação. Essa dimensão foi obtida através da ferramenta do próprio ANSYS HFSS.

A geometria de matrioska aplicada ao filtro está exemplificada na Figura 25, consistindo em uma matrioska com dois anéis interconectados.

Figura 25 – Geometria de matrioska escolhida.



a) Anel de matrioska



b) Anel de matrioska expandido

Fonte: Autoral.

Fazendo $W_{xma1} = W_{yma1} = W_{m1}$ e $W_{xma2} = W_{yma2} = W_{m2}$, as medidas da matrioska utilizada como DGS no filtro estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões das quatro geometrias matrioska utilizadas.

	W_{m1} [mm]	W_{m2} [mm]	W_{ma} [mm]	g [mm]
DGS1	17,0	11,0	1,5	1
DGS2	15,5	9,5	1,5	1
DGS3	14,0	8,0	1,5	1
DGS4	12,5	6,5	1,5	1

As equações iniciais do projeto são utilizadas como ponto de partida para a definição das dimensões dos filtros. A partir destas equações, os filtros são simulados numericamente e ajustados até a obtenção das características desejadas.

Para a geometria matrioska com dois anéis interconectados, a equação 3.1 determina sua frequência de ressonância a partir da constante dielétrica efetiva da microfita e das dimensões da matrioska.

$$F_{res}(GHz) = \frac{0,3}{L_{efe}\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (3.1)$$

Onde,

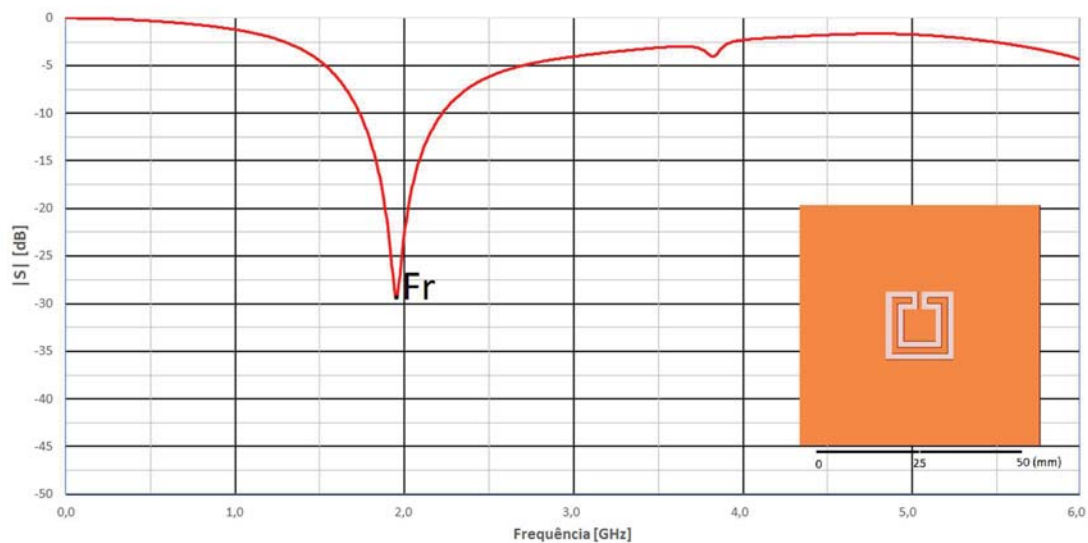
$$L_{efe} = 3(W_{a1} + W_{a2}) \quad (3.2)$$

$$W_{ai} = (W_{mi} - 0,5W_{ma}), \quad i = 1,2 \quad (3.3)$$

O valor de ϵ_{ref} pode ser calculado através da equação 2.11, ou utilizando programas como AppCAD [40].

A Figura 26 mostra o gráfico da resposta em frequência do filtro com a primeira DGS, onde pode-se observar uma frequência de ressonância em 1,96 GHz com atenuação de -29,5 dB. Utilizando a equação 3.1, a frequência de ressonância calculada diretamente foi de 2,11 GHz, ou seja, uma diferença de -7,65% entre o simulado numericamente e o calculado pelas equações de projeto.

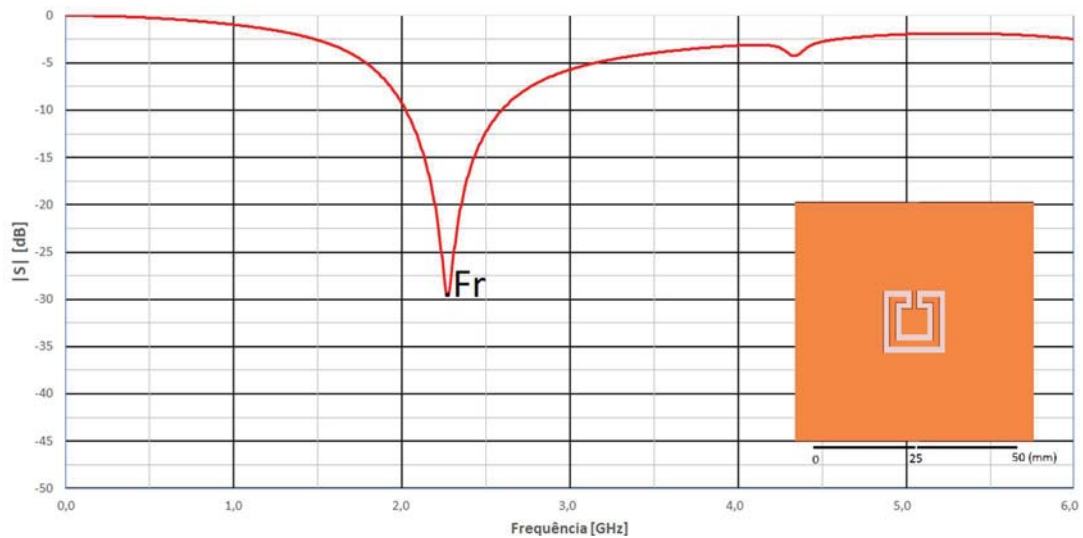
Figura 26 – Resposta em frequência do filtro DGS1.



Fonte: Autoral.

A Figura 27 mostra o gráfico da resposta em frequência do filtro com a segunda DGS, que apresenta uma frequência de ressonância em 2,28 GHz com atenuação de -29,6 dB. Utilizando novamente a equação 3.1, foi então calculada uma frequência de ressonância de 2,37 GHz, uma diferença de -3,95 % entre o simulado e o calculado pelas equações.

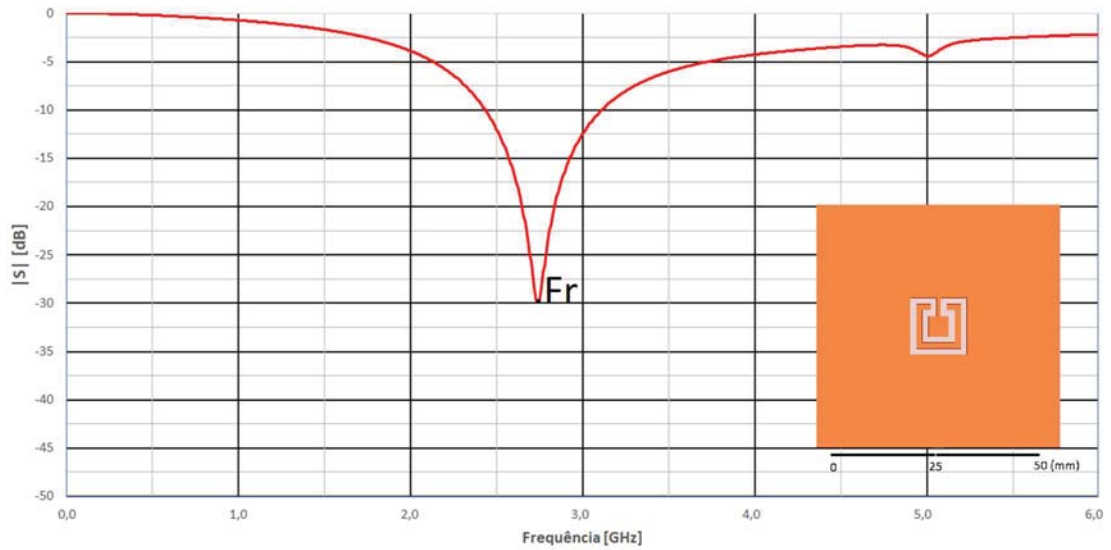
Figura 27 – Resposta em frequência do filtro DGS2.



Fonte: Autoral.

A Figura 28 mostra o gráfico da resposta em frequência do filtro com a terceira DGS, apresentando uma frequência de ressonância de 2,74 GHz com uma atenuação de -30 dB. A frequência de ressonância calculada pela equação 3.1 foi de 2,73 GHz, ou seja, uma diferença de apenas 0,36 % entre o valor calculado pelas equações e o simulado numericamente.

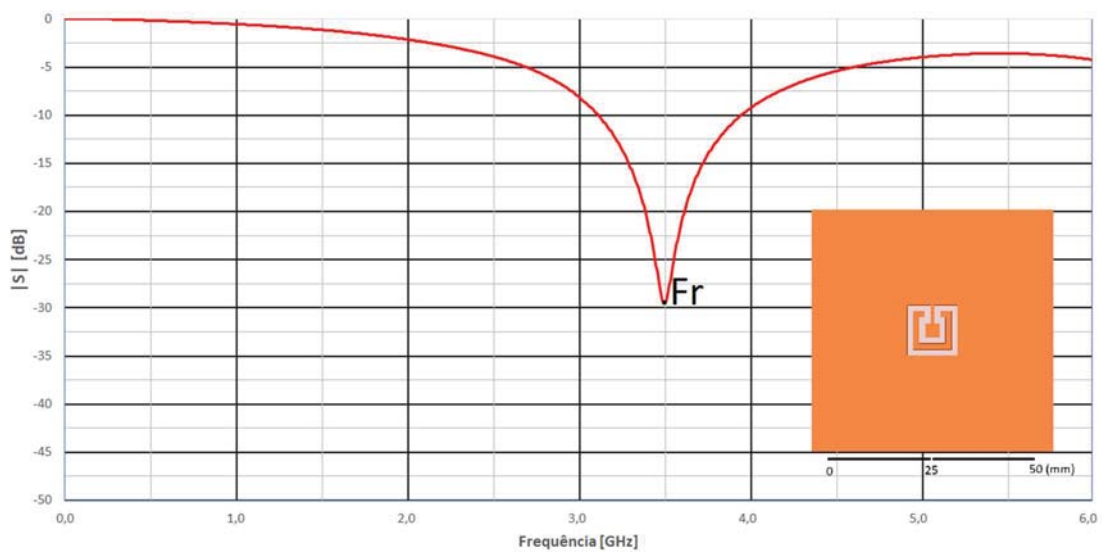
Figura 28 – Resposta em frequência do filtro DGS3.



Fonte: Autoral.

Por fim, a Figura 29 mostra o gráfico da resposta em frequência do filtro com a quarta DGS, com uma frequência de ressonância simulada de 3,50 GHz e atenuação de -29,5 dB. Calculando com a equação 3.1, foi obtida uma frequência de 3,20 GHz, uma diferença de 8,57 % entre a equação e a simulação.

Figura 29 – Resposta em frequência do filtro DGS4.



Fonte: Autoral

A Tabela 2 mostra as características resumidas de cada filtro simulado juntamente com as frequências de ressonância calculadas diretamente pela equação 3.1. A região de transição foi definida como a região presente entre as atenuações de -3 dB e -10 dB. A largura de banda (BW) foi definida para a região situada entre as atenuações de -10 dB.

Tabela 2 – Características observadas para a resposta em frequência dos filtros.

	F_r [GHz]	Região de Transição [GHz]	BW [GHz]	F_r Equação [GHz]	Diferença Equação/Simulação
DGS1	1,96	0,38	0,48	2,11	-7,65 %
DGS2	2,28	0,46	0,52	2,37	-3,95 %
DGS3	2,74	0,58	0,67	2,73	0,36 %
DGS4	3,50	0,83	0,83	3,20	8,57 %

4 Conclusões

Neste trabalho foi realizado a análise numérica de quatro filtros utilizando geometrias matrioska como DGS. Juntamente com a análise numérica, foram feitos cálculos utilizando equações de projeto já conhecidas com o intuito de verificar se os resultados obtidos numericamente e os calculados pelas equações coincidiam.

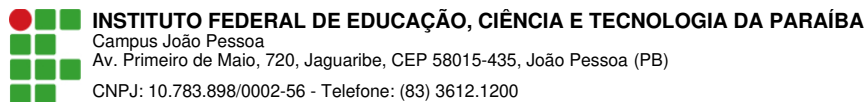
Dessa forma, verificou-se a funcionalidade do filtro DGS com geometria matrioska, além de corroborar a equação de projeto inicial, como mostrado na Tabela 2. Deste modo, o estudo realizado atingiu os objetivos propostos, colaborando assim com futuras investigações.

REFERÊNCIAS

- [1] JR., L. E. F. *Principles of Electronic Communication Systems*. Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill Education, 2016. v. 4.
- [2] FUNDAÇÃO GERTÚLIO VARGAS. Pesquisa Anual do Uso de TI. 2021. Disponível em: <<https://eaesp.fgv.br/producao-intelectual/pesquisa-anual-uso-ti>>. Acesso em: 24 maio 2021.
- [3] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Measuring the information society report*. Geneva, Suíça, 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/publications/misr2018.aspx>>. Acesso em: 24 maio 2021.
- [4] REED, J.; VASSILIOU, M.; SHAH, S. *The role of new technologies in solving the spectrum shortage*. *Proceedings of the IEEE*, v. 104, n. 6, p. 1163–1168, 2016.
- [5] 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.
- [6] HONG, J.-S.; LANCASTER, M. J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. Nova Iorque, EUA: John Wiley Sons, Inc., 2001.
- [7] ITOH, T. et al. *A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure*. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 49, n. 1, p. 86–93, 2001.
- [8] FERREIRA, H. de P. A. *Matrioska: Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas*. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil, 2014.
- [9] SHENOI, B. A. *Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design*. Hoboken, EUA: John Wiley Sons, Inc., 2006.
- [10] MUSSOI, F. L. R. *Resposta em Frequência FILTROS PASSIVOS*. Florianópolis, SC, Brasil: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2004. v. 2.
- [11] SUNDARARAJAN, D. *A Practical Approach to Signals and Systems*. Cingapura: John Wiley Sons, Inc., 2008.
- [12] WILLIAMS, A. B.; TAYLOR, F. J. *Electronic Filter Design Handbook*. Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill Education, 2006. v. 4.
- [13] POZAR, D. M. *Microwave Engineering*. Hoboken, EUA: John Wiley Sons, Inc., 2012. v. 4.

- [14] MARIANO, J. G. de O. Implementação de Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2017.
- [15] LACANETTE, K. *A Basic Introduction to Filters - Active, Passive, and Switched Capacitor*. [S.l.]: National Semiconductor, 2010.
- [16] NETO, A. F. Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska com Anéis Retangulares e Circulares. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil, 2020.
- [17] PAVAN, T.; CARNEIRO, A. Introdução a filtros digitais. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1687753/mod_resource/content/0/Filtros.pdf>. Acesso em: 01 Junho 2021.
- [18] MINI-CIRCUITS. *Waveguide Bandpass Filters*. Disponível em: <<https://www.minicircuits.com/products/Waveguide-Filters.html>>. Acesso em: 03 Junho 2021.
- [19] M2GLOBAL. SRF Products. Disponível em: <<https://m2global.com/rf-products/filters-diplexers//>>. Acesso em: 29 Janeiro 2021.
- [20] WU, Y. *Compact Microwave Dual-band Bandpass Filter Design*. 212 f. Tese (Doctor of Philosophy in Electronic Engineering) — University of York, Iorque, Inglaterra, 2017.
- [21] SARKAR, T. K. et al. *History of Wireless*. Hoboken, EUA: John Wiley Sons, Inc., 2006.
- [22] ALTIUM DESIGNER. *Stripline vs Microstrip: PCB Routing Differences and Guidelines*. 2020. Disponível em: <<https://resources.altium.com/p/stripline-vs-microstrip-understanding-their-differences-and-their-pcb-routing-guidelines>>. Acesso em: 01 Junho 2021.
- [23] JAHN, S. *Single microstrip line*. 2007. Disponível em: <<http://qucs.sourceforge.net/tech/node75.html>>. Acesso em: 01 Junho 2021.
- [24] JEN, Y. J. *Miniaturized Filter Design*. 76 f. Dissertação (Master of Engineering) — National University of Singapore, Cingapura, 2003.
- [25] GUPTA, K. C. et al. *Microstrip Lines and Slotlines*. Norwood, EUA: Artech House, 1996. v. 2.
- [26] ROSU, I. *Circuitos Microondas y Microstrip*. Disponível em: <<https://radioaficionsdr.es.tl/Circuitos-Microondas-y-Microstrip.htm>>. Acesso em: 02 Junho 2021.

- [27] SOUZA, F. A. A. de. Aplicação de DGS em Formato H para Supressão e Atenuação de Modos de Ordem Superior em Antenas de Microfita. 83 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, 2020.
- [28] WENG, L. H. et al. *An overview on defected ground structure. Progress In Electromagnetics Research B*, v. 7, p. 173–189, 2008.
- [29] MANDAL, M. K.; SANYAL, S. *A novel defected ground structure for planar circuits. IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 16, n. 2, p. 93–95, 2006.
- [30] CHAUDHARY, G. et al. *Design of dual-band bandpass filter using dgs with controllable second passband. IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 21, n. 11, p. 589–591, 2011.
- [31] LIM, J.-S. et al. *A spiral-shaped defected ground structure for coplanar waveguide. IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 12, n. 9, p. 330–332, 2002.
- [32] BOUTEJDAR, A. et al. *Control of bandstop response of cascaded microstrip lowpass bandstop filters using arrowhead slots in backside metallic ground plane. 2005.*
- [33] CHEN, H.-J. et al. *A novel cross-shape dgs applied to design ultra-wide stopband lowpass filters. IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 16, n. 5, p. 252–254, 2006.
- [34] ROUHI, R. et al. *Compact elliptic function lowpass filter based on defected ground structure. IEICE Electronics Express*, v. 7, n. 6, p. 434–439, 2010.
- [35] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Boneca de madeira da Rússia - Matrioska. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/159156f>>. Acesso em: 18 Junho 2021.
- [36] SIGNIFICADOS. Significado de Matrioska. 2020. Disponível em: <<https://www.significados.com.br/matrioska/>>. Acesso em: 18 Junho 2021.
- [37] MARIANO, J. G. de O. Implementação de Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil, 2017.
- [38] NETO A. G., et al. Análise da aplicação da geometria matrioska aos filtros em microfita, in MOMAG2016, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 25–29 de julho, 2016, pp. 1-5.
- [39] ANSYS. Disponível em: <<https://www.ansys.com>>. Acesso em: 06 Novembro 2021.
- [40] AppCAD. Disponível em: <<http://www.hp.woodshot.com/>>. Acesso em: 29 Janeiro 2021.



Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC Marcello Aires

Assunto: TCC Marcello Aires
Assinado por: Marcello Aires
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

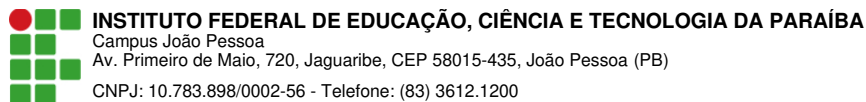
Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcello de Araujo Aires, ALUNO (20151610139) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 24/10/2022 19:57:06.

Este documento foi armazenado no SUAP em 24/10/2022. 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: 657381
Código de Autenticação: 77fe1bd67c





Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC Marcello Aires

Assunto: TCC Marcello Aires
Assinado por: Marcello Aires
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcello de Araujo Aires, ALUNO (20151610139) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 29/10/2022 14:14:39.

Este documento foi armazenado no SUAP em 29/10/2022. 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: 660524
Código de Autenticação: b362f7e383

