



Marcus Estêvão Sousa Lopes

Investigação do Uso de Alimentação Assimétrica em Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska

João Pessoa – PB

2024



Marcus Estêvão Sousa Lopes

Investigação do Uso de Alimentação Assimétrica em Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Jefferson Costa e Silva, Dr.

Coorientador: Alfrêdo Gomes Neto, Dr.

João Pessoa – PB, 2024
©Marcus Estêvão Sousa Lopes

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

L864i	Lopes, Marcus Estêvão Sousa. Investigação do uso de alimentação assimétrica em filtros planares baseados na geometria matrioska / Marcus Estêvão Sousa Lopes. – 2024. 99 f. : il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba – IFPB / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2024. Orientação : Prof. D.r Jefferson Costa e Silva. Coorientação : Prof. D.r Alfredo Gomes Neto. 1. Micro-ondas. 2. Filtros. 3. Matrioska. 4. Assimétricos. 5. Miniaturização. I. Título. CDU 537-962(043)
-------	---



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

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*

MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCUS ESTÊVÃO SOUSA LOPES

**INVESTIGAÇÃO DO USO DE ALIMENTAÇÃO ASSIMÉTRICA EM FILTROS PLANARES BASEADOS NA
GEOMETRIA MARIOSKA**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB - Campus João Pessoa.

Aprovado em 11 de junho de 2024.

Membros da Banca Examinadora:

Dr. Jefferson Costa e Silva

IFPB – PPGEE

Dr. Alfrêdo Gomes Neto

IFPB - PPGEE

Dr. Joabson Nogueira de Carvalho

IFPB – PPGEE

Dr. Gustavo Araújo Cavalcante

IFPB - PPGEE

Dr. Eduardo Jorge Brito Rodrigues

ANATEL

João Pessoa/2024

Documento assinado eletronicamente por:

- Cleumar da Silva Moreira, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - PPGEE-JP em 20/06/2024 12:23:54.
- Jefferson Costa e Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/06/2024 12:28:30.
- Alfredo Gomes Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/06/2024 12:28:42.
- Eduardo Jorge Brito Rodrigues, PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL, em 20/06/2024 12:46:41.
- Joabson Nogueira de Carvalho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/06/2024 13:20:02.
- Gustavo Araujo Cavalcante, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/06/2024 11:01:00.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 29/05/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 567481
Verificador: 474fb1ca67
Código de Autenticação:



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

A minha mãe, cujo incentivo foi essencial durante a realização do mestrado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, por ter me incentivado durante todo o período de árduo trabalho que foi o período de realização do mestrado.

Agradeço também aos professores do curso de mestrado em engenharia elétrica do IFPB, pela acolhida, paciência e disposição no repasse dos conhecimentos.

Igualmente, agradeço a instituição IFPB, fornecedora da bolsa de estudos que foi essencial para que eu pudesse concluir o mestrado.

À banca examinadora e aos meus colegas de curso, agradeço por tudo.

“O homem não é nada além daquilo que a
educação faz dele.”

Immanuel Kant

RESUMO

Os filtros são utilizados em sistemas de comunicação com a função de selecionar frequências, atenuando-as ou não. Pesquisas recentes, com foco na miniaturização, baixo custo e aplicação nas comunicações sem fio, requerem o desenvolvimento de novas configurações de filtros. No grupo de telecomunicações e eletromagnetismo aplicado (GTEMA), do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), foi proposta uma geometria baseada nas bonecas russas matrioska que vem sendo aplicada para a confecção de filtros planares. Pesquisas anteriores aplicaram a geometria matrioska em filtros planares com alimentações simétricas. Nesta dissertação, investiga-se o seu uso em filtros planares com alimentações assimétricas. Inicialmente, discorre-se sobre a teoria da geometria matrioska e sua variante aberta aplicada a filtros planares com alimentações simétricas. As equações disponíveis na literatura para o cálculo das frequências de ressonância desses filtros com alimentações simétricas são apresentadas e validadas. É realizada a análise dos filtros matrioska com alimentações assimétricas, onde se constata que é possível controlar as frequências de ressonância isoladamente ou em conjunto, a depender da parametrização utilizada. Nesse controle, em algumas parametrizações, observam-se impactos na atenuação livre e BW . Para os filtros com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada, análises constataram que é possível controlar a sua atenuação livre, por meio de alterações no posicionamento ou dimensão do trecho de linha de transmissão entre os anéis matrioska em cascata. Foram fabricados cinco filtros com alimentações assimétricas, dois deles com um anel do tipo C e três com geometria matrioska aberta. Constatou-se que os filtros com geometria matrioska aberta e com alimentações assimétricas fabricados, em seu conjunto, possuem como vantagens, com relação aos com alimentações simétricas, dos quais são derivados, a miniaturização e uma BW maior. Além disso, possuem como desvantagem a atenuação livre menor, contornável para os filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos por meio da adição de mais um ressonador em cascata.

Palavras-Chave: Micro-ondas, filtros, matrioska, assimétricos, miniaturização.

ABSTRACT

Filters are used in communication systems with the function of selecting frequencies, attenuating them or not. Recent research, focusing on miniaturization, low cost and application in wireless communications, requires the development of new filter configurations. In the telecommunications and applied electromagnetism group (GTEMA), of the Federal Institute of Education, Science and Technology of Paraíba (IFPB), a geometry based on Russian matryoshka dolls was proposed, which has been applied for the manufacture of planar filters. Previous research has applied matryoshka geometry to planar filters with symmetrical feeds. In this dissertation, we investigate its use in planar filters with asymmetric feeds. Initially, the theory of matryoshka geometry and its open variant applied to planar filters with symmetrical feeds is discussed. The equations available in the literature for the calculation of the resonance frequencies of these filters with symmetrical feeds are presented and validated. The analysis of the matryoshka filters with asymmetric feeds is carried out, where it is verified that it is possible to control the resonant frequencies alone or together, depending on the parameterization used. In this control, in some parameterizations, impacts on free attenuation and BW are observed. For filters with two cascading matryoshka rings, with two concentric rings each, analyses found that it is possible to control their free attenuation by changing the positioning or dimension of the transmission line stretch between the cascading matryoshka rings. Five filters with asymmetric feeds were manufactured, two of them with a type C ring and three with an open matryoshka geometry. It was found that the filters with open matryoshka geometry and asymmetric feeds manufactured, as a whole, have the advantages of miniaturization and a higher BW in relation to the symmetrical feeds ones from which they are derived. In addition, they have the disadvantage of lower free attenuation, which can be avoided for filters with a matryoshka ring with two concentric rings by adding another cascade resonator.

Key words: Microwaves, filters, matryoshka, asymmetrical, miniaturization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Exemplos de equipamentos com a conectividade estabelecida com ou sem fio.....	21
Figura 2- Geometria matrioska com anéis retangulares.....	22
Figura 3- Filtros com dois anéis matrioska em cascata..	23
Figura 4- Esquemas das filtragens analógica e digital.....	25
Figura 5- Componentes passivos.....	26
Figura 6- Exemplo de componente ativo.....	26
Figura 7- Exemplos de filtros.....	27
Figura 8- A microfita.....	28
Figura 9- Exemplo de ressonadores utilizados em filtros.....	29
Figura 10- Respostas do filtro passa-baixas.....	30
Figura 11- Respostas do filtro passa-altas.....	31
Figura 12- Respostas do filtro passa-faixa.....	32
Figura 13- Respostas do filtro rejeita-faixa.....	33
Figura 14- Alguns parâmetros associados aos filtros passa-baixas.....	34
Figura 15- Alguns parâmetros associados aos filtros rejeita-faixa matrioska com alimentações simétricas.....	35
Figura 16- Passos para a obtenção da geometria matrioska.....	38
Figura 17- Geometria matrioska fechada com dois anéis concêntricos.....	39
Figura 18- Filtro com geometria matrioska fechada com dois anéis concêntricos – Alimentações simétricas.....	39
Figura 19- Geometria matrioska fechada com três anéis concêntricos.....	39
Figura 20- Filtro com geometria matrioska fechada com três anéis concêntricos – Alimentações simétricas.....	40
Figura 21- Geometria matrioska aberta com dois e três anéis concêntricos.....	40
Figura 22- Filtro com um anel do tipo C.....	41
Figura 23- Filtro com geometria matrioska aberta com dois anéis concêntricos – Alimentações simétricas.....	41
Figura 24- Filtro com geometria matrioska aberta com três anéis concêntricos – Alimentações simétricas.....	43
Figura 25- Simulação e cálculo da $f_{res}(1)$ e $f_{res}(2)$ - Geometria matrioska	

	aberta com dois anéis concêntricos e alimentações simétricas.	45
Figura 26-	Simulação e cálculo da $fres(1)$ e $fres(2)$ - Geometria matrioska aberta com três anéis concêntricos e alimentações simétricas.	46
Figura 27-	Filtro com um anel do tipo C - Alimentações assimétricas – Parametrização 1.....	48
Figura 28-	Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta.	48
Figura 29-	Filtros com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta – Parametrização 1.....	48
Figura 30-	Filtro com um anel do tipo C - Alimentações assimétricas - Parametrização 1.....	50
Figura 31-	Filtro com um anel do tipo C - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P1.....	51
Figura 32-	Filtro com um anel do tipo C - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P2.....	51
Figura 33-	Filtro com um anel do tipo C - Análise paramétrica - $L1e$	52
Figura 34-	Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 1.....	53
Figura 35-	Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P1.	54
Figura 36-	Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P2.	54
Figura 37-	Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 2.	55
Figura 38-	Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 2 – Análise paramétrica – P1.	56
Figura 39-	Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 2 – Análise paramétrica – P2.	56
Figura 40-	Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Análise paramétrica - $L1e$ e $L2e$	57
Figura 41-	Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas - Parametrização 1...	58

Figura 42- Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P1.....	59
Figura 43- Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P1 – Atenuação livre..	59
Figura 44- Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P2.....	60
Figura 45- Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P2 – Atenuação livre..	61
Figura 46- Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Análise paramétrica – <i>d</i>	62
Figura 47- Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Análise paramétrica – <i>a</i>	63
Figura 48- Primeira comparação de análises de filtros assimétricos.	64
Figura 49- Segunda comparação de análises de filtros assimétricos.	65
Figura 50- Terceira comparação de análises de filtros assimétricos.	66
Figura 51- Quarta comparação de análises de filtros assimétricos.....	67
Figura 52- Quinta comparação de análises de filtros assimétricos.....	68
Figura 53- Sexta comparação de análises de filtros assimétricos.	69
Figura 54- Representação visual dos parâmetros.	72
Figura 55- Ressonadores – Área ocupada.	73
Figura 56- Parâmetros de avaliação dos resultados.....	73
Figura 57- Filtros com um anel do tipo C.....	74
Figura 58- Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos.....	74
Figura 59- Filtros com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada.....	74
Figura 60- Filtros assimétricos fabricados.....	75
Figura 61- Medição de um dos filtros fabricados nesta dissertação com o analisador de redes Agilent E5071C.	76
Figura 62- S ₂₁ (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com um anel do tipo C e alimentações simétricas - Filtro 1.	77
Figura 63- Filtros com um anel do tipo C e alimentações assimétricas.	78

Figura 64-	S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com um anel do tipo C e alimentações assimétricas - Filtro 2.....	78
Figura 65-	S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com um anel do tipo C e alimentações assimétricas - Filtro 3.....	79
Figura 66-	S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtros com um anel do tipo C - Respostas consolidadas.....	80
Figura 67-	S21 (dB) x Freq. (GHz) – Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e alimentações simétricas – Geometria matrioska aberta - Filtro 4.....	82
Figura 68-	Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta.	83
Figura 69-	S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta - Filtro 5.....	84
Figura 70-	S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta - Filtro 6.....	85
Figura 71-	S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos – Geometria matrioska aberta - Respostas consolidadas.....	86
Figura 72-	S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada e alimentações simétricas – Geometria matrioska aberta - Filtro 7.....	88
Figura 73-	Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada – Geometria matrioska aberta – Filtro 8.....	89
Figura 74-	S21 (dB) x Freq. (GHz) – Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada e alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta - Filtro 8.	89
Figura 75-	S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada – Geometria matrioska aberta - Respostas consolidadas.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dimensões dos anéis matrioska com dois anéis concêntricos.....	44
Tabela 2- Dimensões dos anéis matrioska com três anéis concêntricos.....	46
Tabela 3- Dimensões dos ressonadores e parâmetros d e a	49
Tabela 4- Primeira comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P1 - Q	65
Tabela 5- Segunda comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P1 - Q	66
Tabela 6- Terceira comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P1 - Q	67
Tabela 7- Quarta comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P2 - Q	68
Tabela 8- Quinta comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P2 - Q	69
Tabela 9- Sexta comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P2 - Q	70
Tabela 10- Parâmetros em comum dos filtros.....	72
Tabela 11- Filtro com um anel do tipo C - Dados medidos em [16] e simulados nesta dissertação.....	77
Tabela 12- Resultado simulado e medido – Filtro 2.....	79
Tabela 13- Resultado simulado e medido – Filtro 3.....	80
Tabela 14- Filtros com um anel do tipo C - Resultados das medições.....	81
Tabela 15- Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos – Geometria matrioska aberta - Dados medidos em [16] e simulados nesta dissertação.....	83
Tabela 16- Resultado simulado e medido – Filtro 5.....	84
Tabela 17- Resultado simulado e medido – Filtro 6.....	85
Tabela 18- Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos – Geometria matrioska aberta - Resultados das medições.....	86
Tabela 19- Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada – Geometria matrioska aberta - Dados medidos em [16] e simulados nesta dissertação.....	88
Tabela 20- Resultado simulado e medido – Filtro 8.....	90

Tabela 21- Filtros com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis oncêntricos cada – Geometria matrioska aberta - Resultados das medições.	91
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ADC</i>	<i>Analog to digital converter</i> (Conversor analógico-digital)
<i>AL</i>	Atenuação livre
<i>BW</i>	<i>Bandwidth</i> (Largura de banda)
<i>DAC</i>	<i>Digital to analog converter</i> (Conversor digital-analógico)
<i>FSS</i>	<i>Frequency Selective Surfaces</i> (Superfície Seletiva em Frequência)
<i>GTEMA</i>	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
<i>HFSS</i>	<i>High-Frequency Structure Simulator</i> (Simulador de Estrutura de Alta Frequência)
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
<i>IFPB</i>	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
<i>IIT KANPUR</i>	<i>Indian Institute of Technology Kanpur</i> (Instituto de Tecnologia da Índia Kanpur)
<i>RF</i>	Radiofrequência
<i>UFRN</i>	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
<i>Wi-Fi</i>	<i>Wireless Fidelity</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ε_r	Constante dielétrica
ε_{eff}	Constante dielétrica efetiva
dy	Espaçamento entre os anéis
f_0	Frequência central
f_c	Frequência de corte
f_{c1}	Primeira frequência de corte
f_{c2}	Segunda frequência de corte
f_{res}	Frequência de ressonância
$f_{res(1)}$	Primeira frequência de ressonância
$f_{res(2)}$	Segunda frequência de ressonância
$f_{res(3)}$	Terceira frequência de ressonância
f_{t1}	Primeira faixa de transição
f_{t2}	Segunda faixa de transição
g	Largura da fenda
h	Espessura do substrato
IL	Perda de inserção
L_{1e}	Comprimento externo de um dos lados do primeiro anel
L_{1i}	Comprimento interno de um dos lados do primeiro anel
L_{2e}	Comprimento externo de um dos lados do segundo anel
L_{2i}	Comprimento interno de um dos lados do segundo anel
L_{3e}	Comprimento externo de um dos lados do terceiro anel
L_{3i}	Comprimento interno de um dos lados do terceiro anel
L_{eff}	Comprimento efetivo do ressonador
$L_{eff(1)}$	Comprimento efetivo do ressonador para a primeira frequência de ressonância
$L_{eff(2)}$	Comprimento efetivo do ressonador para a segunda frequência de ressonância
λ_0	Comprimento de onda na frequência central
λ_{g0}	Comprimento de onda guiado na frequência de ressonância fundamental

$P1$	Porta 1
$P2$	Porta 2
Q	Fator de qualidade
r	Raio mediano
R	Coeficiente de reflexão
RL	Perda de retorno
t	Espessura da camada de metalização da linha de microfita
T	Coeficiente de transmissão
u	Largura da fita normalizada em relação à altura do substrato
V_g	Máxima variação do ganho na faixa de passagem
W	Largura da fita do filtro
W_0	Largura da fita de alimentação
Z_0	Impedância característica da linha de transmissão (P1 e P2)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 FILTROS - CLASSIFICAÇÕES, PARÂMETROS E DEFINIÇÕES	25
2.1 CLASSIFICAÇÕES DOS FILTROS	25
2.2 PARÂMETROS E DEFINIÇÕES ASSOCIADAS AOS FILTROS.....	33
3 A GEOMETRIA MATRIOSKA	38
3.1 GEOMETRIA MATRIOSKA FECHADA	38
3.2 GEOMETRIA MATRIOSKA ABERTA APLICADA AOS FILTROS PLANARES COM ALIMENTAÇÕES SIMÉTRICAS.....	40
3.2.1 Teste das equações – Geometria matrioska aberta	43
4 FILTROS COM ALIMENTAÇÕES ASSIMÉTRICAS – TIPO C E MATRIOSKA ...	48
4.1 FILTRO COM UM ANEL DO TIPO C – ALIMENTAÇÕES ASSIMÉTRICAS ...	50
4.1.1 Parametrização 1 – Frequência de ressonância	50
4.1.2 Efeito da alteração das dimensões do ressonador	52
4.2 FILTRO COM UM ANEL MATRIOSKA COM DOIS ANÉIS CONCÊNTRICOS – ALIMENTAÇÕES ASSIMÉTRICAS	53
4.2.1 Parametrização 1 – Frequência de ressonância	53
4.2.2 Parametrização 2 – Frequência de ressonância e atenuação livre (AL)	55
4.2.3 Efeito da alteração das dimensões do ressonador	57
4.3 FILTRO COM DOIS ANÉIS MATRIOSKA EM CASCATA, COM DOIS ANÉIS CONCÊNTRICOS CADA	58
4.3.1 Parametrização 1 – Frequência de ressonância e atenuação livre (AL)	58
4.3.2 Efeito da alteração dos parâmetros d e a	61
5 RESULTADOS	71
5.1 PARÂMETROS PARA AS SIMULAÇÕES, MEDIÇÕES E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS ALCANÇADOS	71
5.2 SIMULAÇÕES, MEDIÇÕES E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS ALCANÇADOS	76
5.2.1 Filtros com um anel do tipo C	76
5.2.2 Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos	82
5.2.3 Filtros com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada	87

6 CONCLUSÃO	92
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
6.2 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS POSTERIORES.....	93
REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicações existem há longo tempo e englobam equipamentos com a conectividade estabelecida com ou sem fio, como a televisão a cabo e o telefone celular [1], Figura 1.



Figura 1 — Exemplos de equipamentos com a conectividade estabelecida com ou sem fio.

Essa conectividade estabelecida com ou sem fio constitui o canal, que permite a recepção do sinal transmitido, tendo em vista que o receptor e transmissor estão em locais distintos e muitas vezes distantes, necessitando desse canal para se comunicarem [4].

Nos sistemas de comunicação, um componente importante utilizado é o filtro, o qual é responsável por selecionar os sinais, atenuando-os ou não, obedecendo aos critérios do sistema em que está inserido [5].

Dentre as opções de filtros existentes, os filtros planares são uns dos mais utilizados para aplicações na faixa de micro-ondas, principalmente devido a suas características de baixo peso, dimensão e volume. Diversas geometrias foram propostas para aplicação nessas estruturas, visando melhorar suas características, particularmente a seletividade.

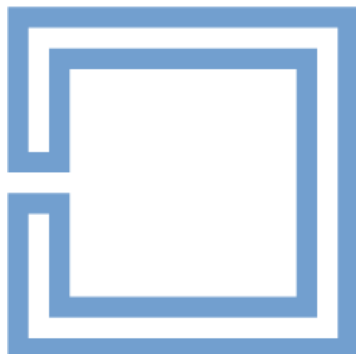
No contexto dessas estruturas planares, uma geometria inspirada nas bonecas russas matrioska, ilustradas na Figura 2(a), foi proposta em 2014 no Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (GTEMA-IFPB) para aplicação inicial em superfícies seletivas em frequência (FSS) [6]-[9]. A referida geometria é composta de um anel externo e um ou mais anéis internos, conectados, conforme

mostrado nas Figuras 2(b) e 2(c). Desde então, sua aplicação foi estendida para filtros, antenas e sensores planares, como demonstrado em artigo recente de revisão sobre a utilização da geometria matrioska em estruturas planares impressas [10], uma proposição original do GTEMA-IFPB. Dentro dessas aplicações, existem aquelas efetuadas por outras instituições, mas baseadas em trabalhos do GTEMA-IFPB, como as da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) [11] e do Instituto de Tecnologia da Índia Kanpur (*IIT Kanpur*) [12], demonstrando que a importância da proposição original vai além do cenário local.

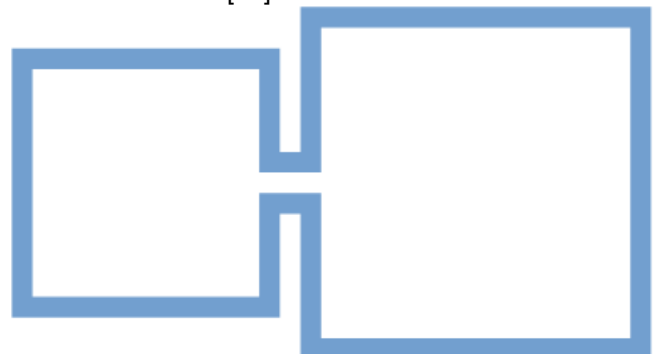
Os filtros que utilizam essa geometria possuem como características a miniaturização e a rápida transição da banda passante para a banda de rejeição, tendo sido projetados com a utilização de alimentação simétrica (centralizada no ressonador), gerando filtros rejeita-faixa [13]-[16]. Entretanto, sabe-se que geometrias com alimentação assimétrica são utilizadas para obter determinadas respostas de frequência [17]–[19]. Assim sendo, nesta dissertação, investiga-se o uso de alimentação assimétrica em filtros planares baseados na geometria matrioska, investigação esta proposta como sugestão de trabalho futuro em [14].



(a) Bonecas russas matrioska [20].



(b) Um anel matrioska com dois anéis concêntricos.



(c) Um anel matrioska com dois anéis concêntricos expandido.

Figura 2 — Geometria matrioska com anéis retangulares.

Esclarecendo o escopo dessa investigação, inicialmente foram reproduzidos numericamente os resultados obtidos em [16], considerando os filtros retangulares com um anel do tipo C, com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada, com alimentações simétricas.

Com base nos resultados numéricos obtidos, em um segundo momento foram efetuadas apenas alterações no posicionamento das alimentações, gerando três filtros com a alimentação assimétrica, um deles com utilização na faixa de frequências de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz para aplicações de *Wi-Fi*, identificando-se suas características e comparando essas características com as dos filtros com alimentações simétricas reproduzidos.

Em um terceiro momento, dois filtros assimétricos foram fabricados com miniaturização em relação aos filtros com alimentações simétricas reproduzidos, dos quais são derivados, possuindo ainda utilização na faixa de frequências de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz para aplicações de *Wi-Fi*, sendo comparados com os filtros nos quais foram baseados.

Nas análises da resposta em frequência dos filtros, a banda de interesse é a banda de rejeição.

A originalidade desta pesquisa consiste na utilização de alimentações assimétricas nos filtros, algo que ainda não havia sido realizado em filtros planares com a geometria matrioska.

Já o ponto de destaque da pesquisa é o filtro 8 fabricado com geometria matrioska e alimentações assimétricas, o qual acumula vantagens em relação ao filtro 7 com alimentações simétricas reproduzido e no qual é baseado, sendo elas a seletividade, uma *BW* maior, e a miniaturização, considerando uma mesma utilização na faixa de frequências de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz para aplicações de *Wi-Fi*, Figura 3.



Figura 3 — Filtros com dois anéis matrioska em cascata.

Os demais capítulos da dissertação são os que seguem: o Capítulo 2 abordará as classificações, parâmetros e definições associadas aos filtros; o Capítulo 3 abordará a geometria matrisoska fechada e aberta; o Capítulo 4 trata da teoria relacionada aos filtros com alimentações assimétricas desenvolvidos nesta dissertação; o Capítulo 5 apresenta os parâmetros para as simulações, medições e avaliação dos resultados alcançados; o Capítulo 6 apresenta as conclusões da dissertação, com sugestões para a realização de trabalhos futuros.

2 FILTROS - CLASSIFICAÇÕES, PARÂMETROS E DEFINIÇÕES

A literatura sobre os filtros costuma utilizar algumas classificações usuais como a categorização em analógicos ou digitais, em passivos ou ativos, em filtros de componentes concentrados e filtros de componentes distribuídos, em filtros de micro-ondas e, com relação a seleção de frequência, em passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa [1], [21], [22].

Além disso, possuem parâmetros e definições cujo entendimento é necessário para a compreensão de suas características e funcionamento, como as faixas de passagem, as frequências de corte (f_c , f_{c1} e f_{c2}), a faixa de transição, a faixa de rejeição, a atenuação, a atenuação livre (AL), a máxima variação do ganho na faixa de passagem (V_g), a perda de retorno (RL), a perda de inserção (IL), o fator de qualidade (Q), e a seletividade [1], [22], [23].

Nas próximas subseções, serão abordadas essas classificações, parâmetros e definições.

2.1 CLASSIFICAÇÕES DOS FILTROS

Uma das classificações dos filtros os separa em analógicos ou digitais. Os filtros analógicos servem para filtrar um sinal que, no domínio do tempo, muda ininterruptamente e de forma contínua, enquanto os filtros digitais filtram o equivalente digital de um sinal analógico que serve como entrada para eles, gerando como saída o sinal analógico já filtrado [1], Figura 4.

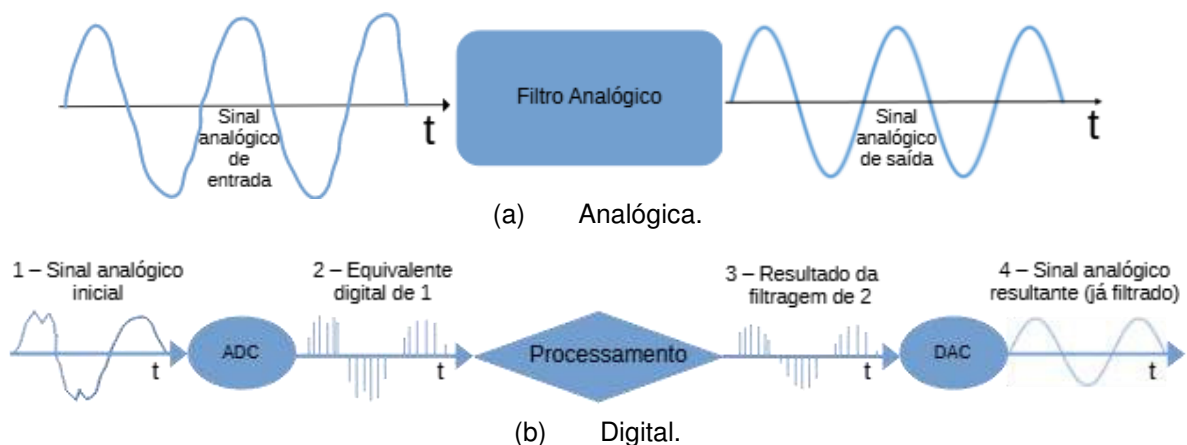


Figura 4 — Esquemas das filtragens analógica e digital.

A segunda classificação de filtros que será tratada aqui é a que os divide em filtros passivos e ativos. Os filtros passivos são aqueles em que são utilizados componentes passivos, tais como capacitores e indutores, Figura 5, na sua construção [22].

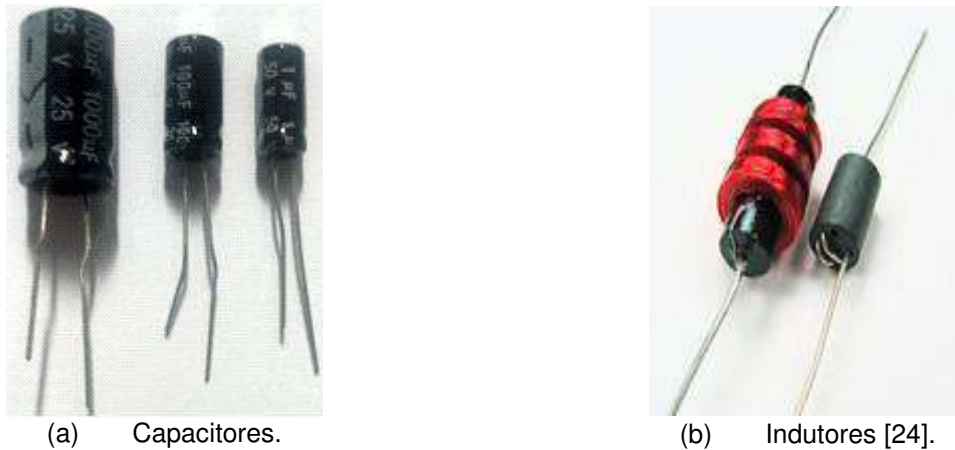


Figura 5 — Componentes passivos.

Por outro lado, os filtros ativos, além de utilizarem componentes passivos, usam também componentes ativos, como os amplificadores operacionais [22], Figura 6.

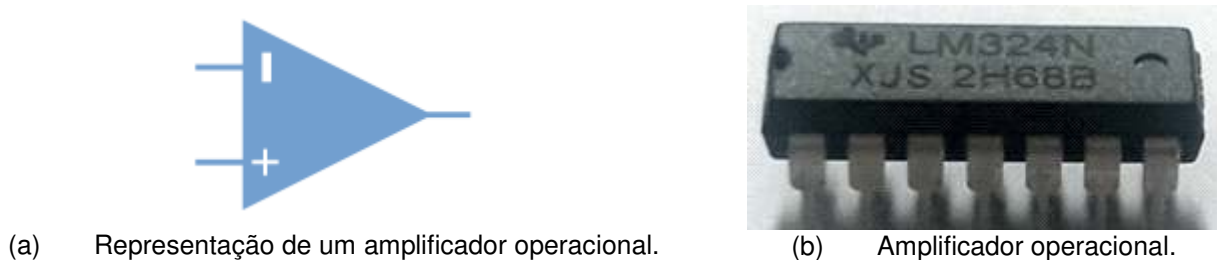
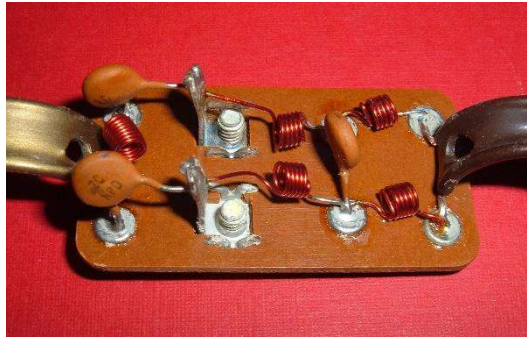


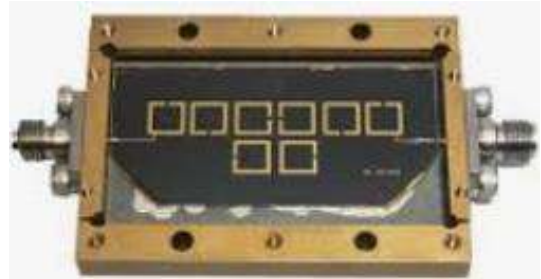
Figura 6 — Exemplo de componente ativo.

Outra classificação está relacionada às dimensões dos componentes dos filtros, podendo ser de componentes concentrados, quando o tamanho dos componentes é muito menor que o comprimento de onda na frequência de operação (*maior dimensão* $\ll \lambda_0/4$), ou distribuídos, quando esse tamanho é da ordem do comprimento de onda. Os filtros com componentes concentrados são constituídos de capacitores e indutores, têm utilização em baixas frequências, enquanto os filtros de componentes distribuídos são utilizados nas frequências de micro-ondas, sendo

usualmente fabricados a partir de modificações em linhas de transmissão planares como a microfita e as guias coplanares etc. ou modificações em estruturas guiantes como as guias de ondas e os cabos coaxiais etc. [21], [25], Figura 7. Os filtros estudados nesta dissertação são do tipo distribuído [21], [23], [25].



(a) Filtro com componentes concentrados – Capacitores e indutores [26]



(b) Filtros com componentes distribuídos.

Figura 7 — Exemplos de filtros.

Entre os filtros com componentes distribuídos, têm-se os filtros planares, que são fabricados utilizando técnicas de circuito impresso, onde diferentes configurações de linhas de transmissão são utilizadas, de maneira a obter uma determinada resposta em frequência. Esses filtros planares são constituídos de estruturas planares que funcionam como capacitores ou indutores, conforme necessidades do projeto [5], [23]. Ao se realizar uma revisão da literatura dos filtros planares, percebe-se que um dos motivadores das pesquisas recentes são as

comunicações móveis, com seus requisitos específicos de resposta em frequência, assim como a necessidade de miniaturização e baixo custo de fabricação [27]-[34].

Dentro dos filtros planares, têm-se os filtros que utilizam a microfita como seu elemento constitutivo.

Utilizada bastante em projetos de micro-ondas, tendo como características a miniaturização e versatilidade [35], a microfita é constituída por um substrato dielétrico entre um plano terra e uma fita condutora [5], Figura 8.

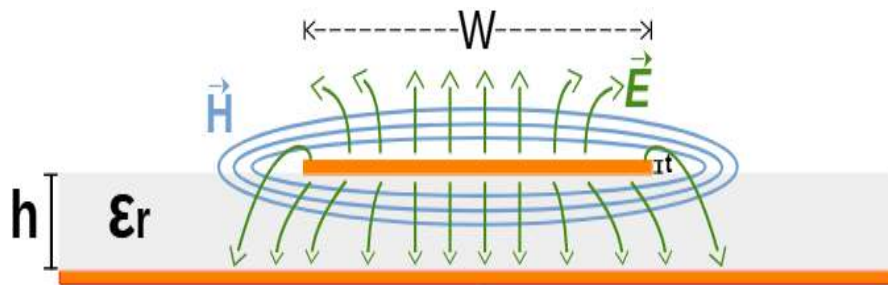


Figura 8 — A microfita.

Na microfita, as linhas de campo estão presentes tanto no ar, acima do condutor e do substrato, como no próprio substrato [5], [23].

Ainda, nos filtros de microfita existem estruturas utilizadas para a obtenção de determinada resposta em frequência, como os ressonadores, Figura 9, cuja ressonância é associada a suas dimensões [5], [25].

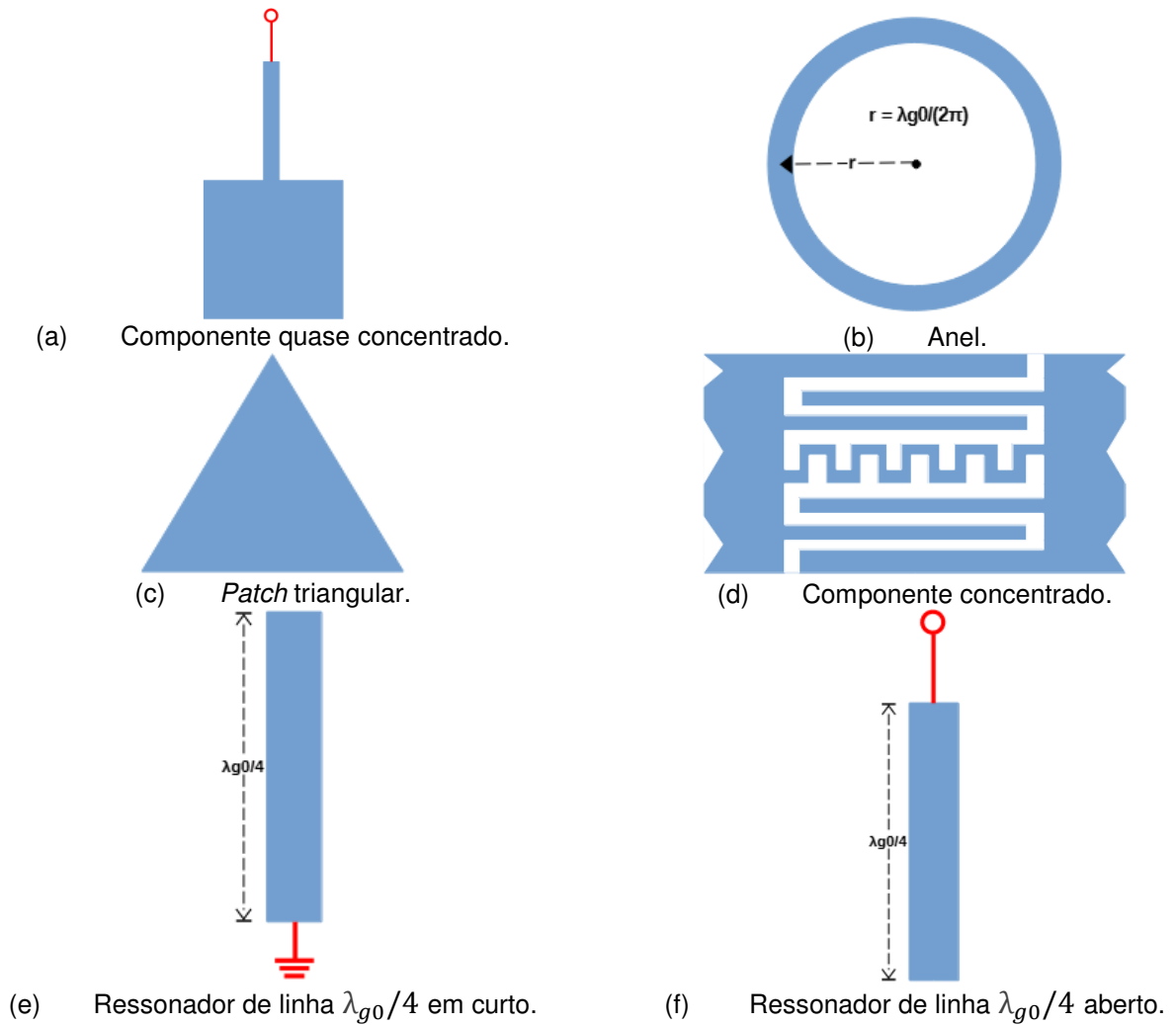


Figura 9 — Exemplo de ressonadores utilizados em filtros.

Considerando agora a resposta em frequência, os filtros podem ser classificados ainda em passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa [22], [36].

Idealmente, nos filtros passa-baixas, dada uma frequência de corte f_c , passam apenas as frequências abaixo dela [22], [36], Figura 10(a). Na prática, essa atenuação é gradativa, definindo-se uma frequência de corte, a partir de um certo valor de atenuação em relação ao máximo sinal de saída, em geral 3 dB, o que corresponde à metade da máxima potência de saída, Figura 10(b).

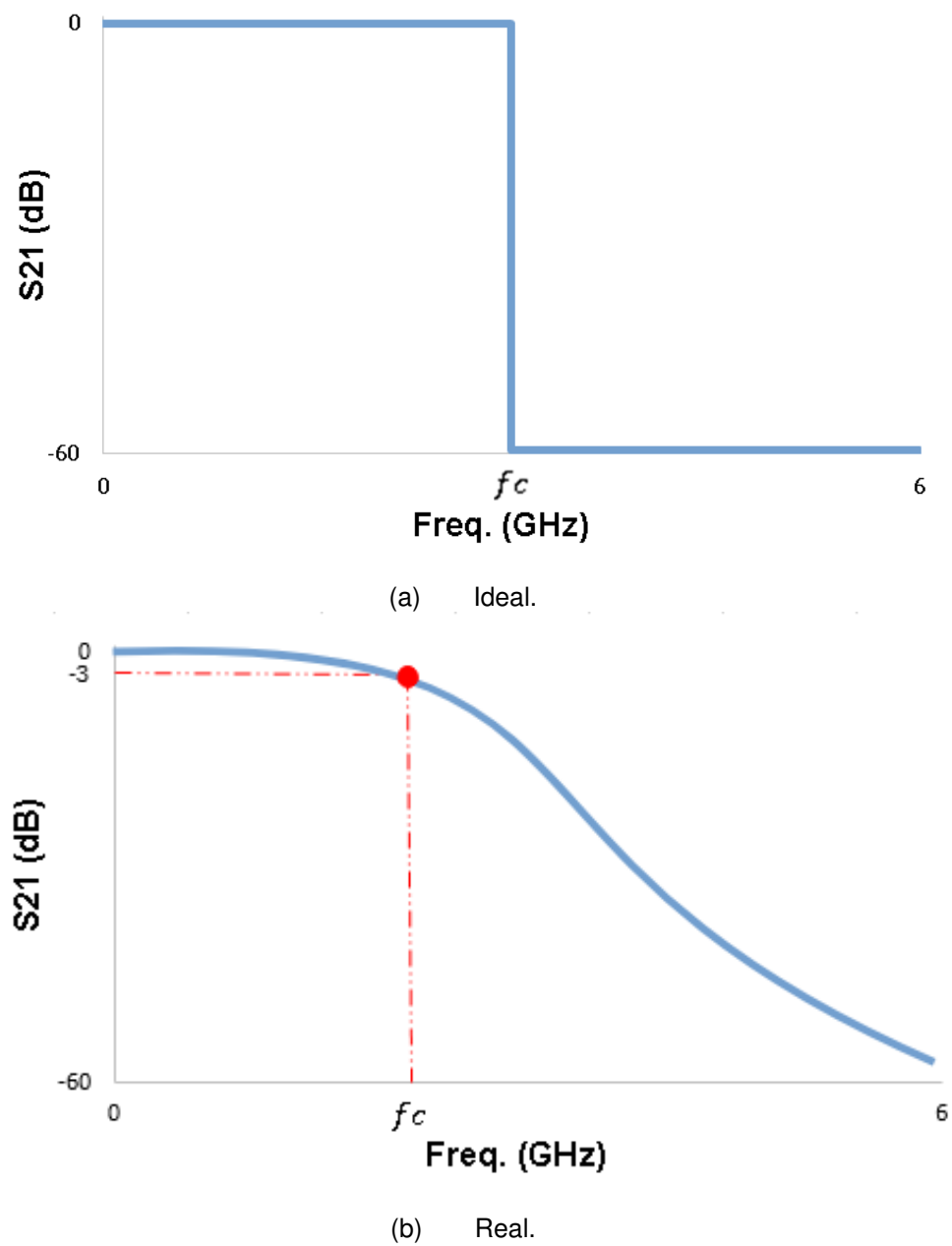


Figura 10 — Respostas do filtro passa-baixas.

Inversamente, nos filtros passa-altas, dada uma frequência de corte f_c , idealmente passam apenas as frequências acima dela [22], [36], Figura 11.

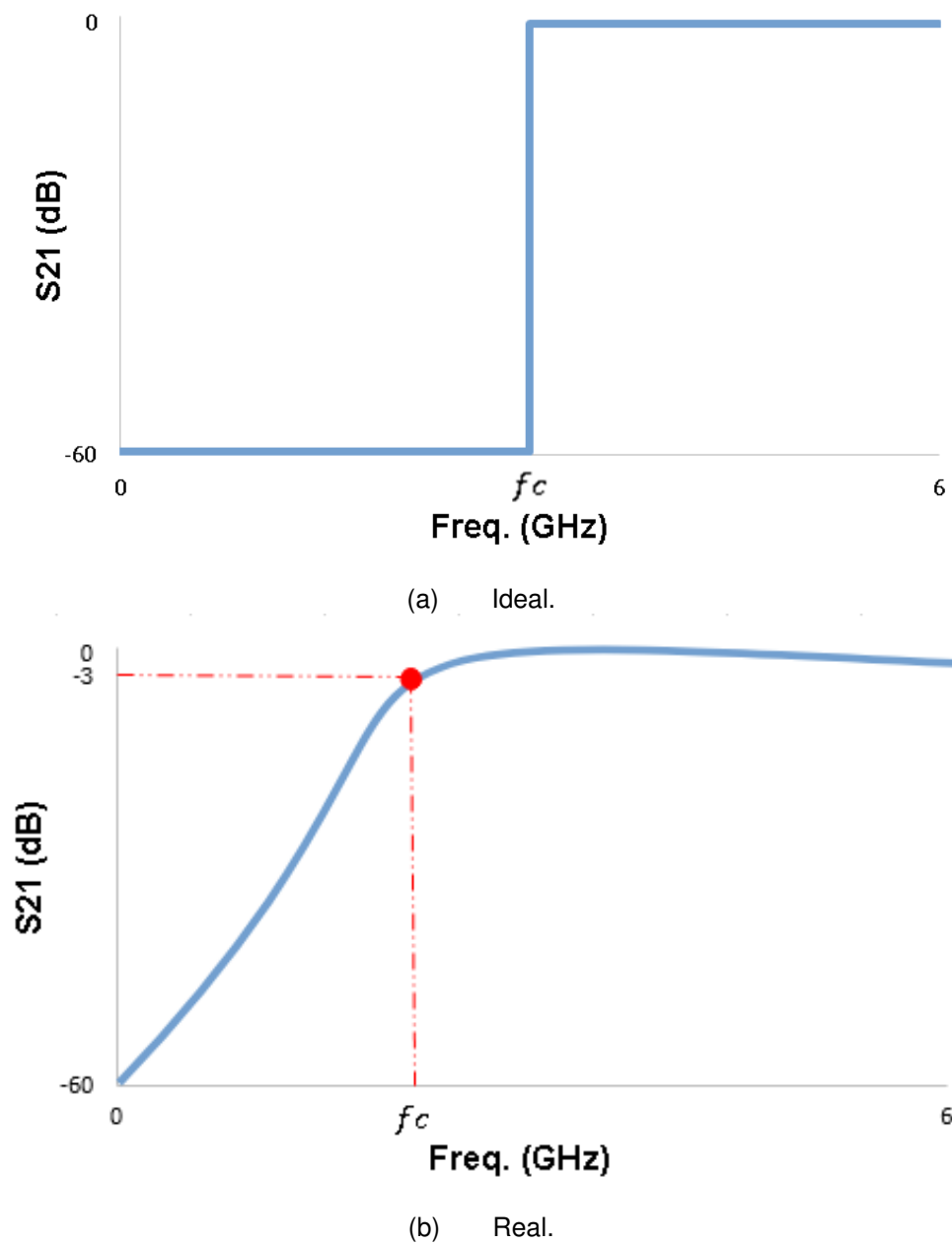
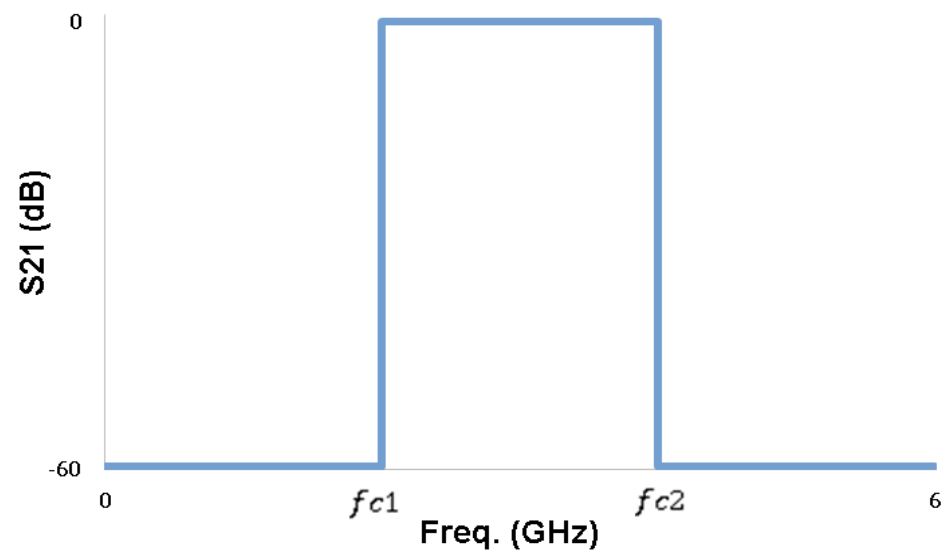
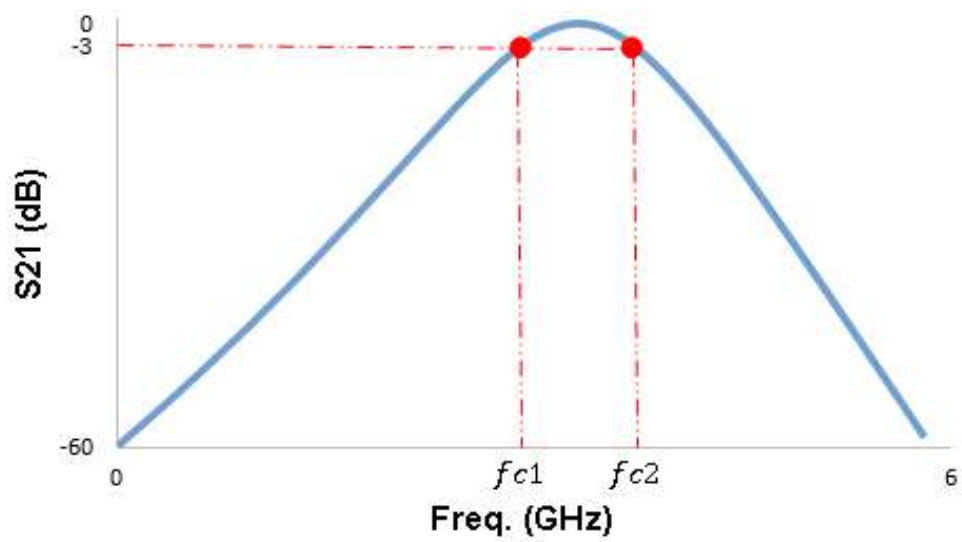


Figura 11 — Respostas do filtro passa-altas.

Já nos filtros passa-faixa, dadas duas frequências de corte f_{c1} e f_{c2} , passam apenas as frequências entre elas [22], [36], Figura 12.



(a) Ideal.



(b) Real.

Figura 12 — Respostas do filtro passa-faixa.

Por último, nos filtros rejeita-faixa, dadas duas frequências de corte f_{c1} e f_{c2} , as frequências entre elas são atenuadas [22], [36], Figura 13.

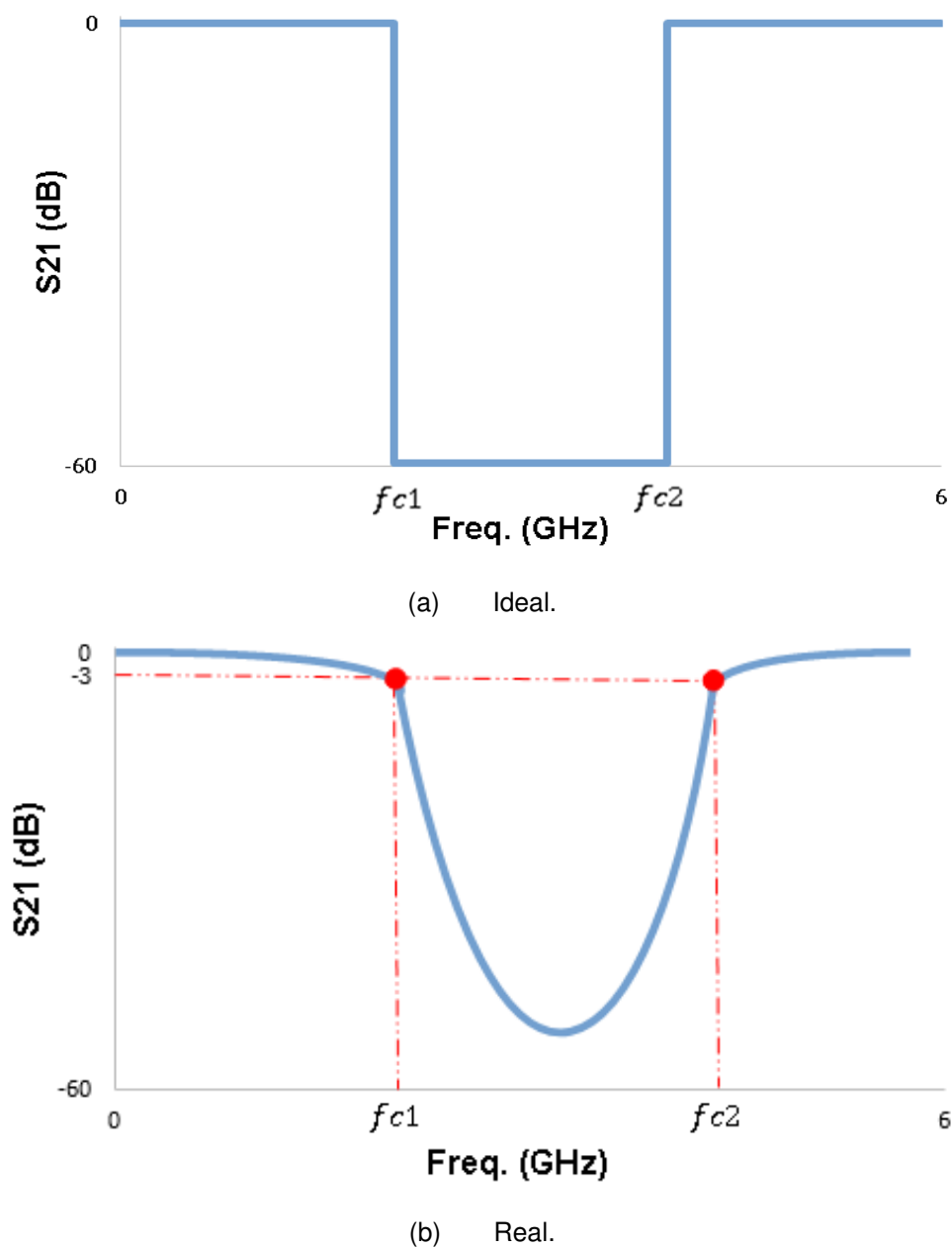


Figura 13 — Respostas do filtro rejeita-faixa.

Na próxima subseção, serão abordados os parâmetros e definições que seguem: faixas de passagem, frequências de corte, faixa de transição, faixa de rejeição, atenuação, atenuação livre (AL), máxima variação do ganho na faixa de passagem (V_g), perda de retorno (RL), perda de inserção (IL), fator de qualidade (Q) e seletividade.

2.2 PARÂMETROS E DEFINIÇÕES ASSOCIADAS AOS FILTROS

Existem parâmetros e definições que são importantes para a determinação do desempenho dos filtros. Tomando-se como exemplo os filtros passa-baixas, alguns destes parâmetros podem ser visualizados na Figura 14, os quais serão definidos em seguida. Na sequência, para os filtros rejeita-faixa matrisca com alimentações simétricas, alguns parâmetros também são apresentados na Figura 15. Logo após, outras definições serão apresentadas, igualmente importantes para o estudo dos filtros.

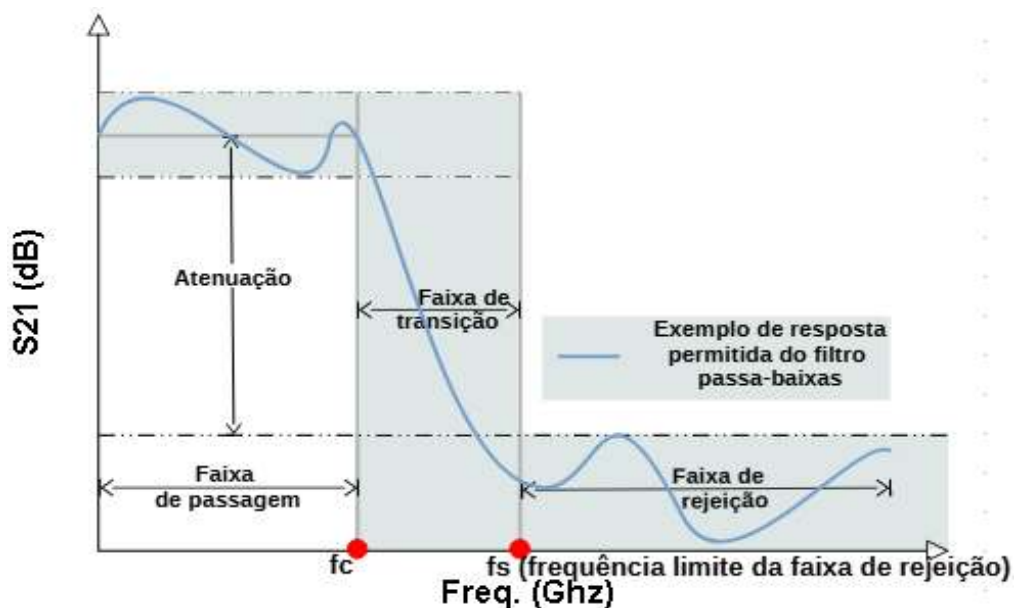


Figura 14 — Alguns parâmetros associados aos filtros passa-baixas.

Na Figura 14, a faixa de passagem é a faixa de frequências onde se considera que o sinal está sendo transmitido, embora na prática possa ocorrer alguma atenuação. A frequência de corte f_c indica o término da faixa de passagem e é definida a partir de um certo valor de atenuação em relação ao máximo sinal de saída, em geral 3 dB, o que corresponde à metade da máxima potência de saída. Já a faixa de transição é a faixa de frequências onde está ocorrendo a transição da faixa de passagem para a faixa de rejeição. A faixa de rejeição, por sua vez, é a faixa de frequências onde se considera que o sinal não está sendo transmitido, embora na prática possa estar ocorrendo um nível de transmissão, abaixo de um valor especificado. Ainda, é necessária uma atenuação mínima para que um sinal em determinada frequência esteja dentro da banda de rejeição [22]. Todos os valores desses parâmetros são dependentes do projeto, e por isso variam de aplicação para aplicação [22].

Na Figura 15, são ilustrados alguns dos parâmetros apresentados na Figura 14 adaptados para os filtros rejeita-faixa matrioska com alimentações simétricas. Assim, observam-se a existência de duas faixas de passagem e duas frequências de corte (f_{c1} e f_{c2}), sendo a faixa de rejeição a própria BW . Ainda, observa-se a atenuação livre (AL) como medida de atenuação do sinal.

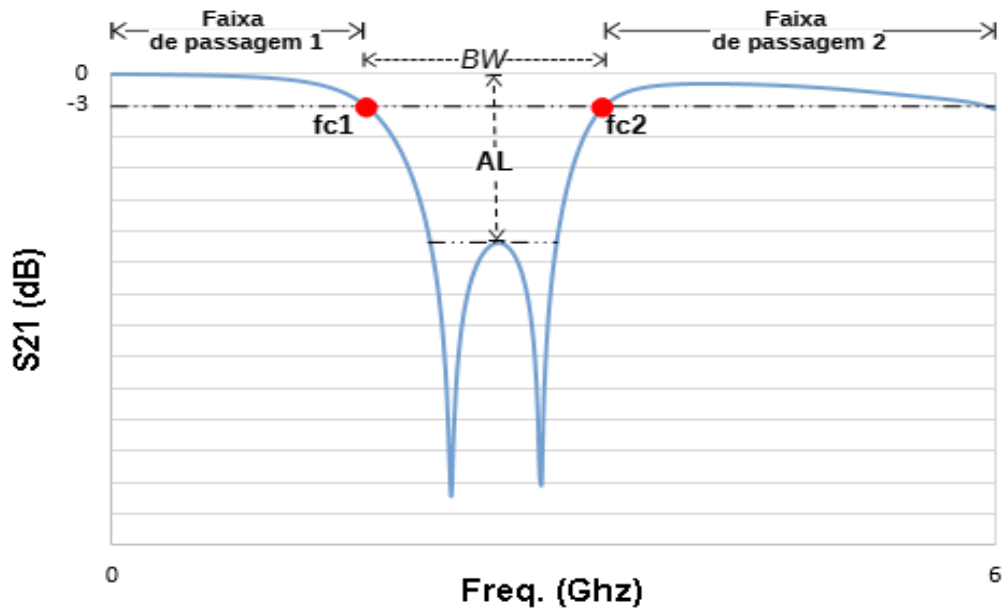


Figura 15 — Alguns parâmetros associados aos filtros rejeita-faixa matrioska com alimentações simétricas.

Da mesma forma que os parâmetros já apresentados, são importantes as definições de máxima variação do ganho permitida nas faixas de passagem, perda de retorno, perda de inserção, fator de qualidade e seletividade.

A máxima variação do ganho na faixa de passagem (V_g) é a variação máxima permitida, dentro dessa faixa na amplitude do sinal, com relação a um determinado valor de amplitude idealmente desejado [22].

A perda de retorno está relacionada com o descasamento de impedância entre o gerador e um dispositivo qualquer, como um filtro [5], [23], e pode ser calculada pela fórmula apresentada em [23]:

$$RL = -20\log|R| \text{ dB}, \quad (1)$$

onde R é o coeficiente de reflexão.

Por outro lado, a perda de inserção representa as perdas que ocorrem quando o sinal é transmitido de um ponto A até um ponto B de um dispositivo qualquer [5], [23], como um filtro de microfita. Essas perdas ocorrem, por exemplo, no substrato e condutor [5]. Em [23] é apresentada a fórmula para cálculo da perda de inserção:

$$IL = -20\log|T| \text{ dB}, \quad (2)$$

onde T é o coeficiente de transmissão.

Com relação ao fator de qualidade dos filtros passa-faixa e rejeita-faixa, ele é calculado por meio das fórmulas apresentadas em [1]:

$$Q = \frac{f_0}{BW}, \quad (3)$$

Onde, para os filtros simétricos,

$$f_0 = \sqrt{f_{c1}f_{c2}}, \quad (4)$$

sendo f_0 a frequência central,

e,

$$BW = f_{c2} - f_{c1}, \quad (5)$$

onde BW é a largura de banda do filtro.

O cálculo do fator de qualidade resulta em um número adimensional que expressa a seletividade de um filtro: quanto maior o Q , maior será a seletividade do filtro [37].

Por sua vez, distinguir frequências é uma função do filtro que é chamada de seletividade, sendo que quanto mais a resposta do filtro se aproxima da ideal, melhor é a sua seletividade, e por isso mesmo a seletividade pode ser aferida também pela faixa de transição de um filtro: quanto menor essa faixa, mais seletivo ele é [1], [22].

No capítulo seguinte, será abordada a geometria matroska, com anéis fechado e aberto, e que será objeto de estudo neste trabalho.

3 A GEOMETRIA MATRIOSKA

A geometria matrioska apresenta como característica principal a existência de anéis concêntricos interligados. Ainda, essa geometria pode ser aberta [8], quando a geometria possui uma fenda de largura g no anel mais interno [14], [16]. Basicamente, a geometria matrioska é obtida seguindo os seguintes passos:

- (a) Primeiro, são projetados dois anéis concêntricos, Figura 16(a);
- (b) A seguir, é introduzida, no mesmo ponto, nos dois anéis, uma fenda, Figura 16(b);
- (c) Depois, os anéis são interligados pela fenda, gerando o anel matrioska, Figura 16(c).
- (d) Por último, caso se queira utilizar a geometria matrioska aberta, basta inserir uma fenda de largura g no anel mais interno, Figura 16(d).

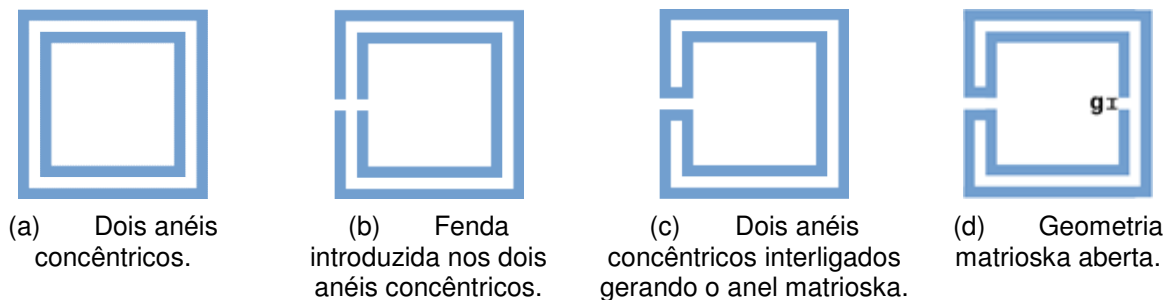


Figura 16 — Passos para a obtenção da geometria matrioska.

Prosseguindo, na subseção seguinte será abordada a geometria matrioska fechada, a qual não possui a fenda de largura g .

3.1 GEOMETRIA MATRIOSKA FECHADA

Compondo o primeiro estudo da geometria matrioska no IFPB [6], no contexto das *FSS*, a geometria matrioska fechada, Figura 17(a), é expandida e suas dimensões são apresentadas na Figura 17(b), para o caso de dois anéis concêntricos.

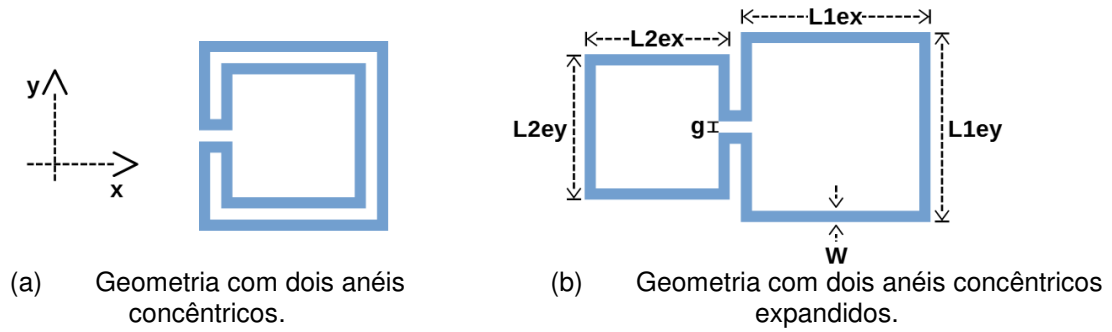


Figura 17 — Geometria matrioska fechada com dois anéis concêntricos.

Em filtros com alimentações simétricas, sua aplicação pode ser visualizada na Figura 18, onde são ilustradas mais algumas de suas dimensões.

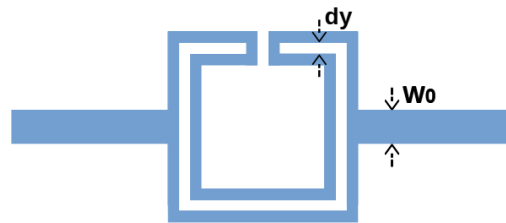


Figura 18 — Filtro com geometria matrioska fechada com dois anéis concêntricos – Alimentações simétricas.

Inserindo-se mais um anel na geometria da Figura 17, obtém-se a geometria matrioska com três anéis concêntricos, Figura 19.

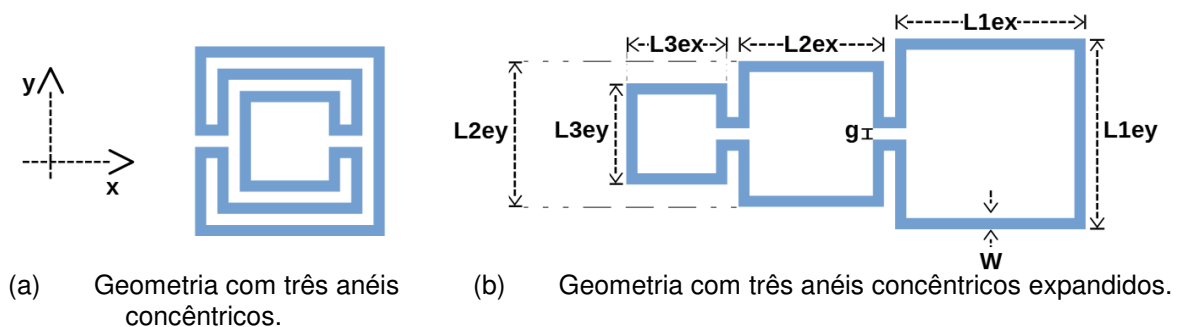


Figura 19 — Geometria matrioska fechada com três anéis concêntricos.

Assim como na geometria matrioska fechada com dois anéis concêntricos, em filtros com alimentações simétricas, a aplicação da geometria matrioska fechada com três anéis concêntricos pode ser visualizada na Figura 20.

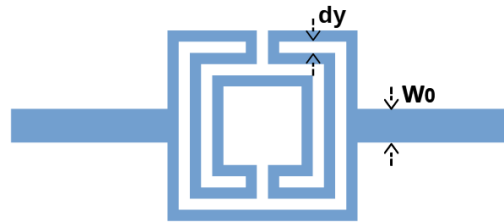


Figura 20 — Filtro com geometria matrioska fechada com três anéis concêntricos – Alimentações simétricas.

Caso as especificações do projeto exijam, mais anéis podem ser inseridos na geometria matrioska fechada.

Na próxima subseção, será abordada a geometria matrioska aberta aplicada aos filtros planares com alimentações simétricas. Essa geometria, comparada à fechada, tem como vantagem uma redução nas dimensões do ressonador para uma mesma frequência de ressonância, tendo sido utilizada na investigação procedida nesta dissertação.

Dessa forma, a geometria matrioska aberta será abordada com mais detalhes do que a geometria fechada, com apresentação e testes das equações para cálculo das frequências de ressonância para filtros com alimentações simétricas que usam essa geometria.

3.2 GEOMETRIA MATRIOSKA ABERTA APLICADA AOS FILTROS PLANARES COM ALIMENTAÇÕES SIMÉTRICAS

Para fins de entendimento da geometria matrioska aberta, Figura 21, aplicada em filtros planares com alimentações simétricas, considere-se preliminarmente um filtro com um anel do tipo C, Figura 22.



Figura 21 — Geometria matrioska aberta com dois e três anéis concêntricos.

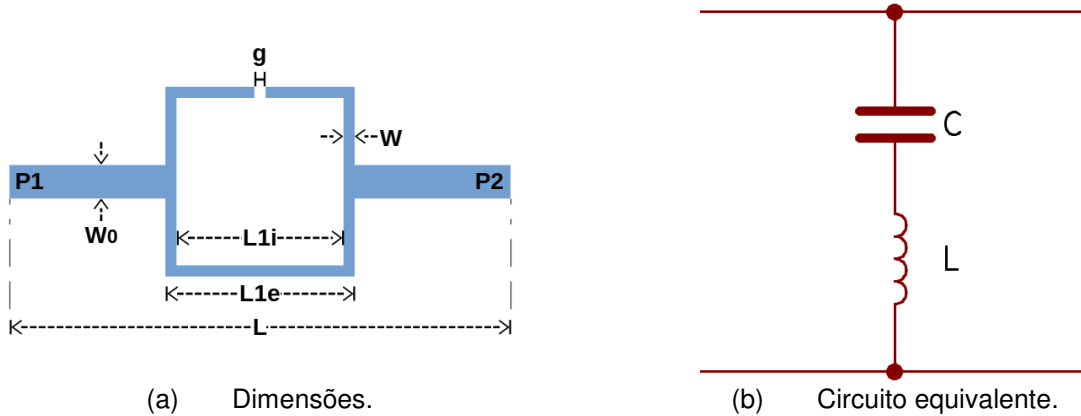


Figura 22 — Filtro com um anel do tipo C.

As características desse filtro rejeita-faixa foram estudadas em [38]–[40], tratando-se de um ressonador em C.

A sua frequência de ressonância, f_{res} pode ser calculada por meio da Equação (6), sendo que o comprimento efetivo do ressonador, L_{eff} é calculado conforme a Equação (7).

$$f_{res}(GHz) = \frac{0,3}{L_{eff}\sqrt{\epsilon_{reff}}}, \quad (6)$$

$$L_{eff} = 4 \frac{(L_{1i} + L_{1e})}{2} - g \quad (7)$$

A partir do anel desse filtro, insere-se um anel interno com uma fenda de largura g , originando o filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos, Figura 23.

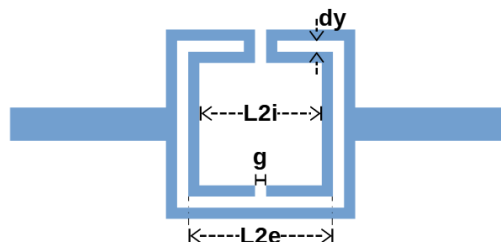


Figura 23 — Filtro com geometria matrioska aberta com dois anéis concêntricos – Alimentações simétricas.

As $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ desse filtro podem ser calculadas por meio das Equações (8)-(10), apresentadas em [13], [14], [16].

$$f_{res(i)}(GHz) = \frac{0,3}{2L_{eff(i)}\sqrt{\epsilon_{reff}}}, i = 1, 2, \quad (8)$$

$$L_{eff(1)} = 3(L_{1i} + L_{2i}) + dy, \quad (9)$$

$$L_{eff(2)} = 3L_{1i} + L_{2i}. \quad (10)$$

onde ϵ_{reff} é a constante dielétrica efetiva e é calculada por meio das Equações (11)-(14) apresentadas em [41].

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{u}\right)^{-ab}, \quad (11)$$

$$u = \frac{W}{h}, \quad (12)$$

$$a = \frac{1}{49} \ln \left(\frac{u^4 + \left(\frac{u}{52}\right)^2}{u^4 + 0,432} \right) + \frac{1}{18,7} \ln \left(1 + \left(\frac{u}{18,1}\right)^3 \right), \quad (13)$$

$$b = 0,564 \left(\frac{\epsilon_r - 0,9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0,053}. \quad (14)$$

Observa-se que a ϵ_{reff} depende de parâmetros do substrato e da fita condutora, quais sejam, ϵ_r , h e W [41].

Inserindo-se mais um anel interno com uma fenda de largura g no filtro com um anel matrioska e com dois anéis concêntricos, o resultado é o filtro com um anel matrioska com três anéis concêntricos, Figura 24.

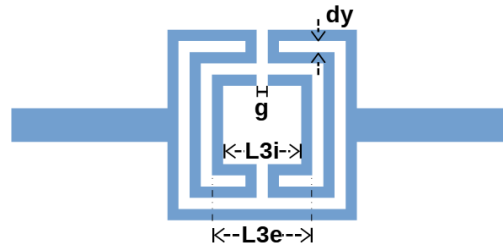


Figura 24 — Filtro com geometria matrioska aberta com três anéis concêntricos – Alimentações simétricas.

Para esse filtro, as $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ podem ser calculadas por meio das Equações (8), (15) e (16), apresentadas em [13], [14], [16].

$$L_{eff(1)} = 3(L_{1i} + L_{2i}) + 2L_{3i}. \quad (15)$$

$$L_{eff(2)} = 3(L_{1i} + L_{3i}) + 2L_{2i}, \quad (16)$$

Essas equações constituem o primeiro passo no projeto dos filtros, gerando um resultado aproximado para o projetista iniciar e otimizar seu trabalho [13], [14], [16].

3.2.1 Teste das equações – Geometria matrioska aberta

Para testar a aplicação das Equações (8)-(10) e (15), (16) para os filtros com geometria matrioska aberta e alimentações simétricas, foram projetadas sete estruturas simétricas matrioska com dois anéis concêntricos e sete com três anéis concêntricos, diferindo umas das outras por meio das dimensões dos anéis matrioska e com os seguintes parâmetros comuns:

- Substrato RO3003™, com tangente de perdas de 0,001, $\epsilon_r = 3,0$ e $h = 1,52$ mm;
- $W = 1$ mm;
- $g = 1$ mm;
- $dy = 1$ mm;
- $W_0 = 3,8$ mm;
- Plano terra com dimensões de 60 mm x 60 mm;

➤ Impedâncias de entrada e saída de 50 Ω .

Essas estruturas foram simuladas apenas para comparação entre as $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ encontradas na simulação e as calculadas pelas equações (8)-(10) e (15), (16), de forma a testar a validade das equações para utilização no início do projeto de filtros com a geometria matrioska aberta e alimentações simétricas. Portanto, não se trata dos filtros que foram fabricados nesta dissertação, a serem apresentados posteriormente.

Assim, as dimensões das estruturas simétricas matrioska com dois anéis concêntricos estão relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1 — Dimensões dos anéis matrioska com dois anéis concêntricos.

	L_{1i} (mm)	L_{2i} (mm)
Estrutura 1	8	4
Estrutura 2	9	5
Estrutura 3	10	6
Estrutura 4	11	7
Estrutura 5	12	8
Estrutura 6	13	9
Estrutura 7	14	10

Essas sete estruturas simétricas matrioska com dois anéis concêntricos foram simuladas e tiveram suas $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ calculadas, Figura 25.

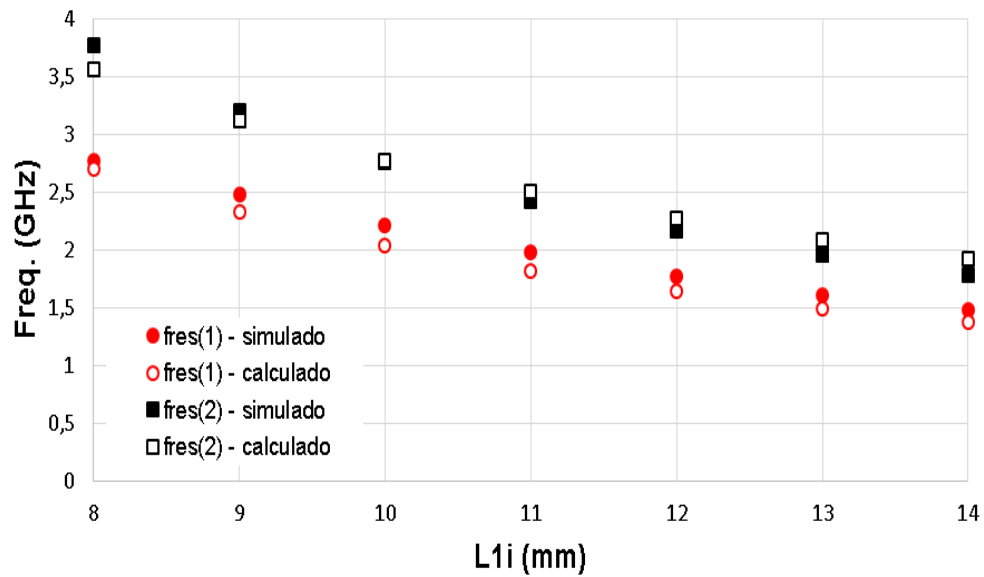


Figura 25 — Simulação e cálculo da $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ - Geometria matrioska aberta com dois anéis concêntricos e alimentações simétricas.

Para a $f_{res(1)}$, observou-se que, com relação ao valor simulado, o valor calculado apresentou uma diferença máxima em torno de 8%, enquanto que para a $f_{res(2)}$ essa mesma diferença máxima foi em torno de 7%, demonstrando que as equações (8)-(10) são adequadas para uma estimativa inicial das $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ na fase inicial do projeto, para filtros com dois anéis concêntricos com alimentações simétricas.

Já para as estruturas simétricas matrioska com três anéis concêntricos, as suas dimensões estão relacionadas na Tabela 2.

Tabela 2 — Dimensões dos anéis matrioska com três anéis concêntricos.

	L_{1i} (mm)	L_{2i} (mm)	L_{3i} (mm)
Estrutura 1	34	30	26
Estrutura 2	35	31	27
Estrutura 3	36	32	28
Estrutura 4	38	34	30
Estrutura 5	39	35	31
Estrutura 6	41	37	33
Estrutura 7	42	38	34

Essas sete estruturas simétricas matrioska com três anéis concêntricos também foram simuladas e tiveram suas $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ calculadas, Figura 26.

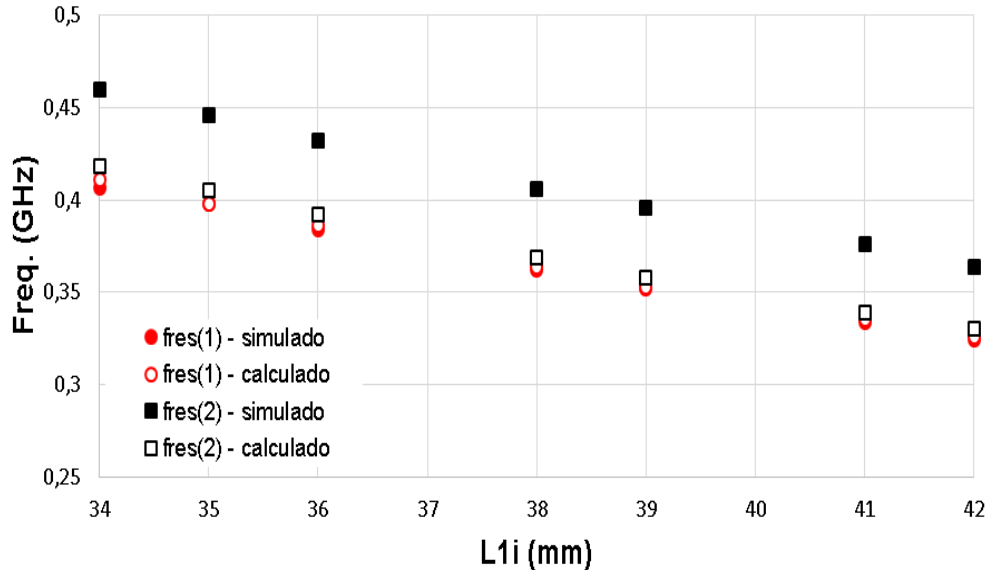


Figura 26 — Simulação e cálculo da $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ - Geometria matrioska aberta com três anéis concêntricos e alimentações simétricas.

Para a $f_{res(1)}$, observou-se que, com relação ao valor simulado, o valor calculado apresentou uma diferença máxima em torno de 1%, enquanto que para a $f_{res(2)}$ essa mesma diferença máxima foi em torno de 9%, demonstrando que as equações (8)-(15) e (16) são adequadas para uma estimativa inicial das $f_{res(1)}$ e

$f_{res(2)}$ na fase inicial do projeto, para filtros com três anéis concêntricos e alimentações simétricas.

No próximo capítulo, será abordada a teoria referente a filtros com um anel do tipo C e com a geometria matrioska aberta com dois anéis concêntricos, todos com alimentações assimétricas. Destaque-se que a mesma análise apresentada para a geometria com dois anéis concêntricos, pode ser realizada para a geometria com três anéis concêntricos.

4 FILTROS COM ALIMENTAÇÕES ASSIMÉTRICAS – TIPO C E MATRIOSKA

Nesta dissertação, foram simulados inicialmente filtros com um anel do tipo C e ressonadores nos quais são inseridos mais anéis interligados para formar a geometria matrioska aberta. São reproduzidos filtros retangulares com lados iguais, como constantes em [16], e a partir dessas reproduções são gerados filtros assimétricos, variando a posição das alimentações. Os parâmetros relacionados às assimetrias das alimentações investigadas podem ser visualizados nas Figuras 27 a 29.

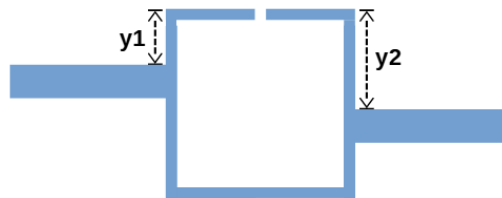


Figura 27 — Filtro com um anel do tipo C - Alimentações assimétricas – Parametrização 1.

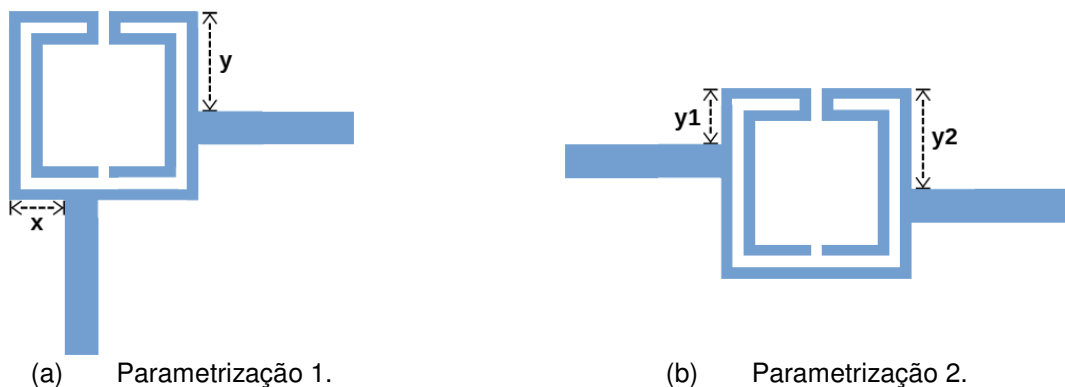


Figura 28 — Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta.

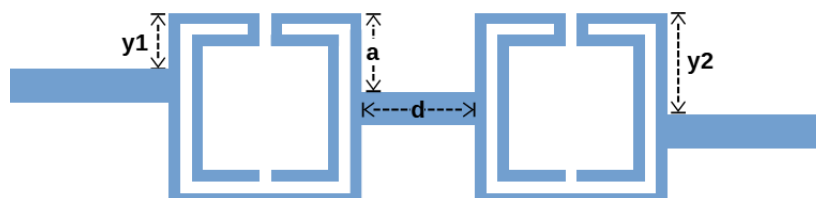


Figura 29 — Filtros com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta – Parametrização 1.

Neste capítulo, para os filtros representados nas Figuras 27 a 29, são variadas de forma independente as alimentações, e seus resultados são apresentados e discutidos. Ainda, para os filtros representados nas Figuras 27 e 28(b), para determinadas posições das alimentações assimétricas, são variadas as dimensões dos ressonadores e seus resultados são apresentados e discutidos. Por último, para os filtros representados na Figura 29, para determinada posição das alimentações assimétricas, são variados d e a , e seus resultados são apresentados e discutidos.

As simulações realizadas neste capítulo utilizaram os mesmos parâmetros comuns utilizados nas simulações de teste das equações no item 3.2.1.

Ainda, são relacionados os valores das dimensões dos ressonadores e dos parâmetros d e a utilizados, Tabela 3. Quando existem vários valores para as dimensões ou parâmetros mencionados, para um determinado tipo de análise que justamente consiste na verificação do efeito decorrente dessas variações, todos os valores são informados na Tabela 3.

Tabela 3 — Dimensões dos ressonadores e parâmetros d e a .

Onde ocorre a análise	Geometria do(s) ressonador(es)	Dimensões ou Parâmetros variados	L_{1e} (mm)	L_{2e} (mm)	d (mm)	a (mm)
Subseção 4.1.1	Anel do tipo C	Alimentações	22	-	-	-
Subseção 4.1.2	Anel do tipo C	L_{1e}	(22/21/20/19/18/17/16/15/14)	-	-	-
Subseção 4.2.1	Matrioska aberta	Alimentações	11,6	7,6	-	-
Subseção 4.2.2	Matrioska aberta	Alimentações	11,6	7,6	-	-
Subseção 4.2.3	Matrioska aberta	L_{1e} e L_{2e}	(11,6/10,6/9,6/8,6)	(7,6/6,6/5,6/4,6)	-	-
Subseção 4.3.1	Matrioska aberta	Alimentações	11,6	7,6	10	3,9
Subseção 4.3.2	Matrioska aberta	d	10,6	6,6	(10/9/8/7/6/5/4/3/2/1)	3,4
Subseção 4.3.2	Matrioska aberta	a	10,6	6,6	10	(0/1/2/3/4/5/6/6,8)

Na próxima subseção será abordado o efeito decorrente da variação das alimentações e dimensões do ressonador na $f_{res(1)}$ e na $f_{res(2)}$ do filtro representado na Figura 27.

4.1 FILTRO COM UM ANEL DO TIPO C – ALIMENTAÇÕES ASSIMÉTRICAS

4.1.1 Parametrização 1 – Frequência de ressonância

Para a parametrização do filtro com um anel do tipo C com alimentações assimétricas, representado na Figura 30, foi realizada a análise variando somente a alimentação referente a P1, mantendo-se fixa a posição da alimentação referente a P2, e depois efetuou-se o inverso, sempre com $L_{1e} = 22$ mm. Com esse valor de L_{1e} , para facilitar o entendimento, dentro do conjunto de variações, a posição $y1 = 9,1$ mm significa que a alimentação é simétrica, sendo isso verdade para $y2$ também.

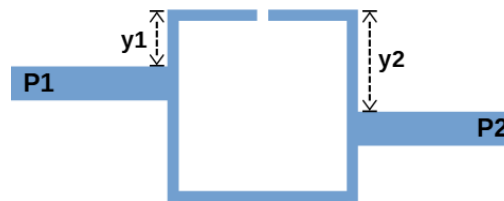


Figura 30 — Filtro com um anel do tipo C - Alimentações assimétricas - Parametrização 1.

Dessa forma, variando a posição da alimentação referente a P1, mantendo-se a P2 fixa em $y2 = 9,1$ mm, valor este escolhido arbitrariamente, observou-se que é possível controlar a $f_{res(1)}$ quando $y1 > 9,1$ mm e a $f_{res(2)}$ quando $y1 < 9,1$ mm, Figura 31.

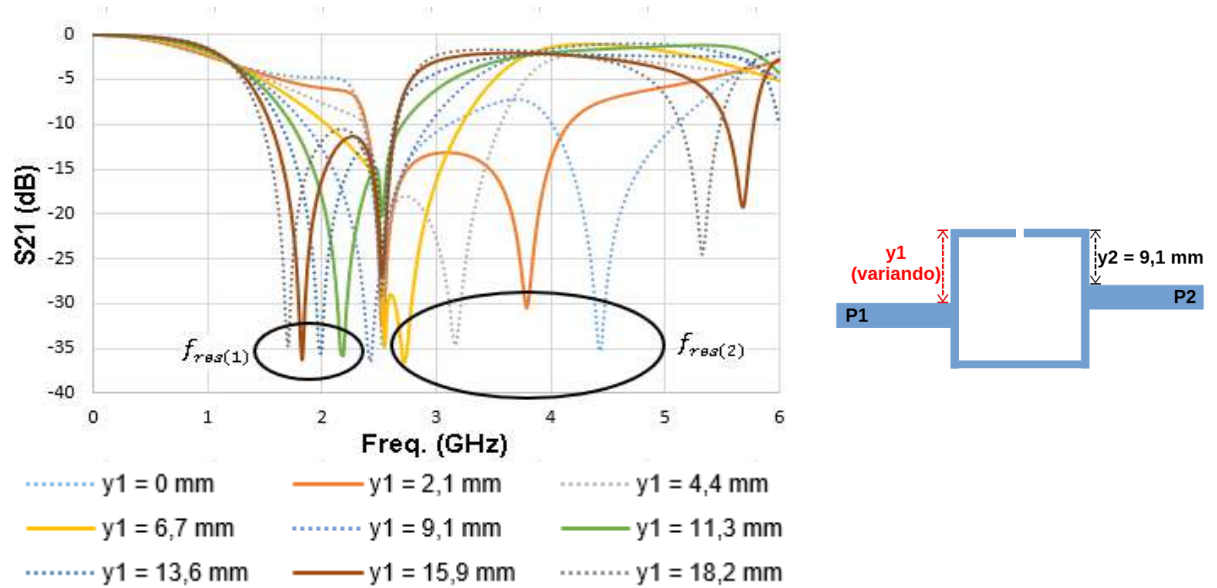


Figura 31 — Filtro com um anel do tipo C - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P1.

Igualmente, como esperado, variando a posição da alimentação referente a P2, mantendo-se a P1 fixa em $y_1 = 9.1$ mm, valor este escolhido arbitrariamente, observou-se que é possível controlar a $f_{res(1)}$ quando $y_2 > 9.1$ mm e a $f_{res(2)}$ quando $y_2 < 9.1$ mm, Figura 32.

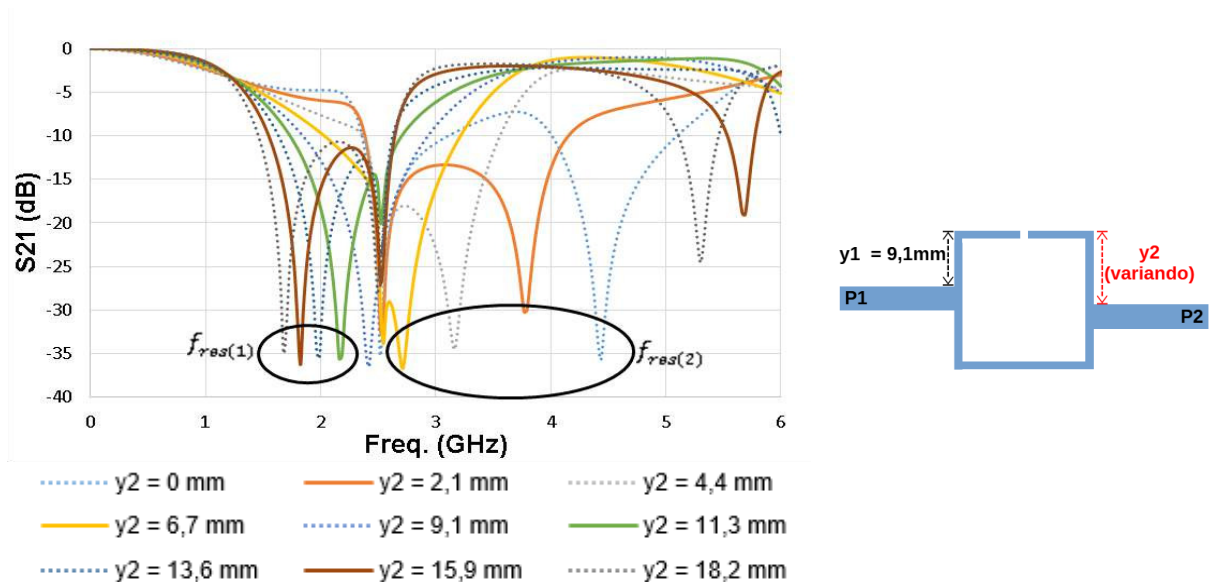


Figura 32 — Filtro com um anel do tipo C - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P2.

4.1.2 Efeito da alteração das dimensões do ressonador

Para a parametrização 1 inicialmente com $L_{1e} = 22$ mm e $y_1 = y_2 = 18,2$ mm, valores estes escolhidos devido a sua maior atenuação livre em comparação com outras configurações assimétricas simuladas variando somente as alimentações, e levando em conta também o potencial de miniaturização, efetuou-se a variação de L_{1e} , Figura 33. Note-se que conforme é efetuada a variação de L_{1e} , por consequência y_1 e y_2 também variam.

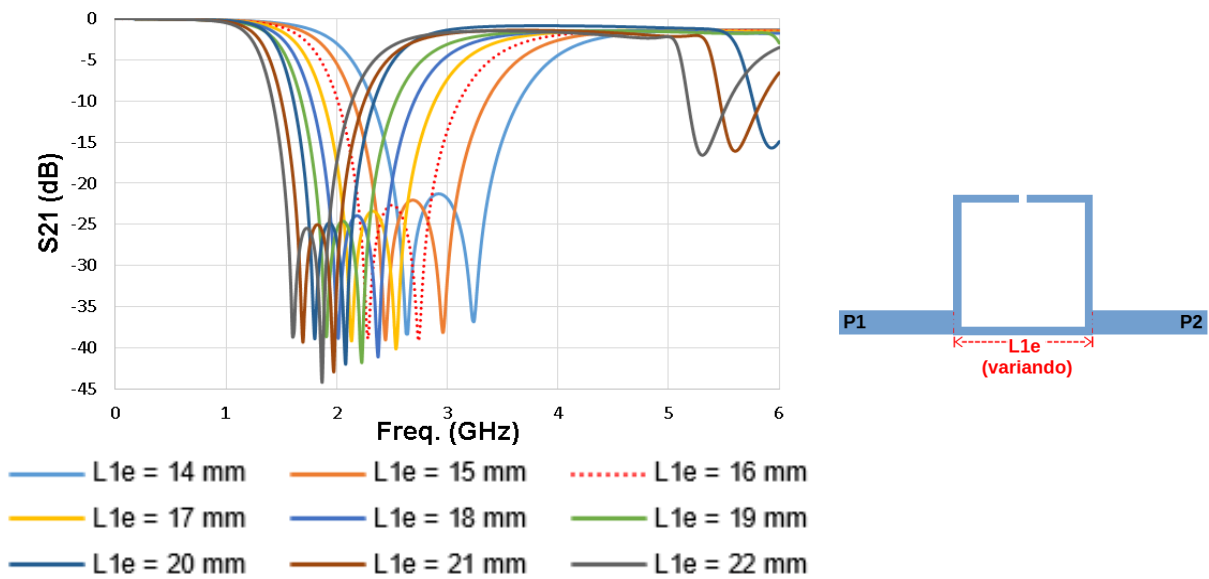


Figura 33 — Filtro com um anel do tipo C - Análise paramétrica - L_{1e} .

Constatou-se que, quanto menor as dimensões do ressonador, maiores são as $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$, sendo o inverso verdadeiro também.

Na subseção seguinte, será abordado o efeito decorrente da variação das alimentações na $f_{res(1)}$, $f_{res(2)}$ e $f_{res(3)}$ do filtro representado na Figura 28(a) e, para o filtro representado na Figura 28(b), o efeito decorrente da variação das alimentações na $f_{res(1)}$, $f_{res(2)}$ e atenuação livre (AL) e o efeito da variação das dimensões do ressonador na $f_{res(1)}$, $f_{res(2)}$, BW e AL.

4.2 FILTRO COM UM ANEL MATRIOSKA COM DOIS ANÉIS CONCÊNTRICOS – ALIMENTAÇÕES ASSIMÉTRICAS

4.2.1 Parametrização 1 – Frequência de ressonância

Para a parametrização do filtro com um anel matrioska, com dois anéis concêntricos e alimentações assimétricas, representado na Figura 34, foi realizada a análise variando somente a alimentação referente a P1, mantendo-se fixa a posição da alimentação referente a P2, e depois efetuou-se o inverso, sempre com $L_{1e} = 11,6$ mm, $L_{2e} = 7,6$ mm e $dy = 1$ mm. Com essas dimensões de ressonador, para facilitar o entendimento, $y = 3,9$ mm ou $x = 3,9$ mm são os valores que tornam a alimentação simétrica.

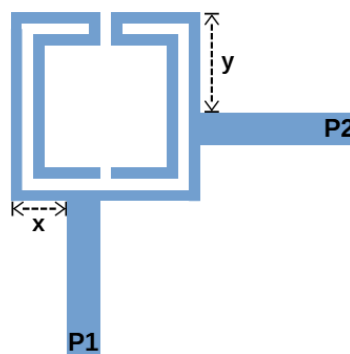


Figura 34 — Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 1.

Observou-se que, variando a posição da alimentação referente a P1, mantendo-se P2 fixa em $y = 3,9$ mm, valor este escolhido arbitrariamente, é possível controlar a $f_{res(1)}$ e $f_{res(3)}$, Figura 35.

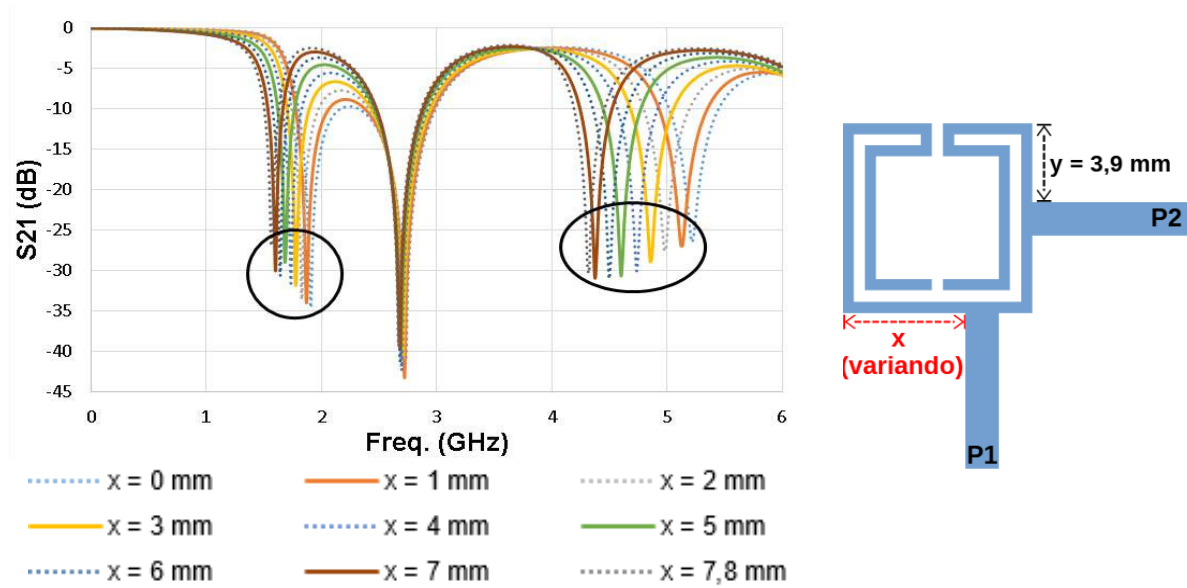


Figura 35 — Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P1.

Já variando a posição da alimentação referente a P2, mantendo-se a P1 fixa em $x = 3,9$ mm, valor este escolhido arbitrariamente, observou-se que é possível controlar a $f_{res(2)}$, Figura 36.

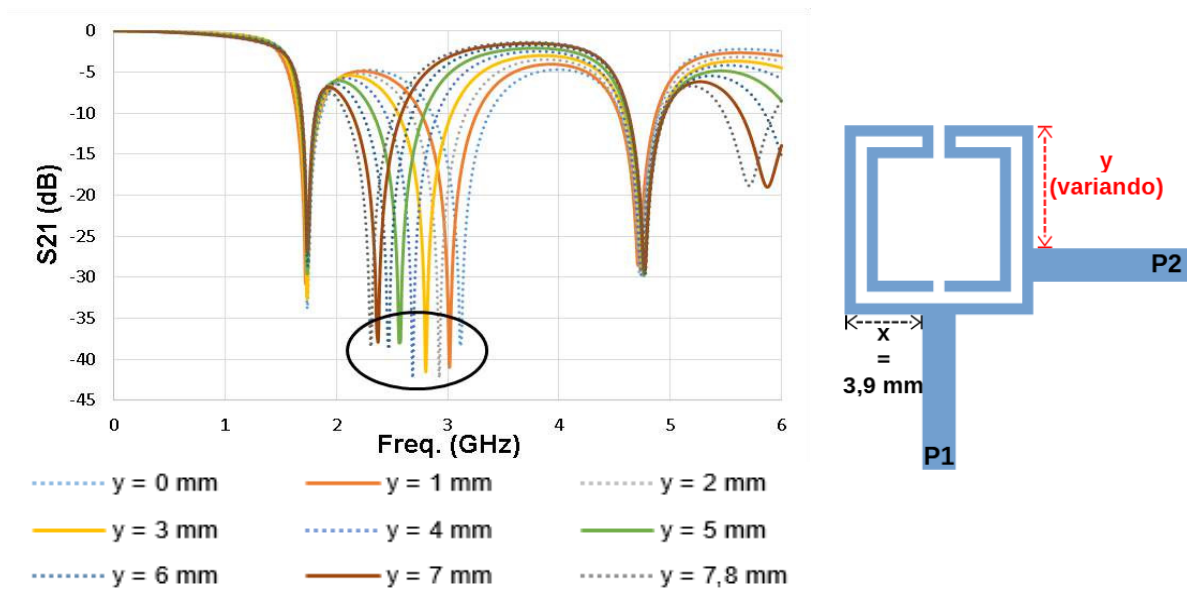


Figura 36 — Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P2.

4.2.2 Parametrização 2 – Frequência de ressonância e atenuação livre (AL)

Para a parametrização do filtro com um anel matrioska e dois anéis concêntricos com alimentações assimétricas, representado na Figura 37, foi realizada a análise variando somente a alimentação referente a P1, mantendo-se fixa a posição da alimentação referente a P2, e depois efetuou-se o inverso, sempre com $L_{1e} = 11,6$ mm, $L_{2e} = 7,6$ mm e $dy = 1$ mm. Com essas dimensões de ressonador, para facilitar o entendimento, $y1 = 3,9$ mm ou $y2 = 3,9$ mm são os valores que tornam a alimentação simétrica.

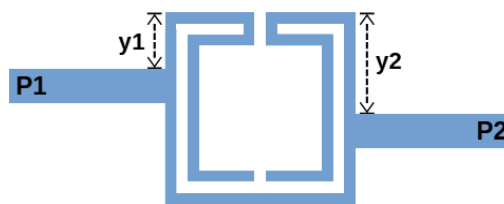


Figura 37 — Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 2.

Nesta parametrização, variando a posição da alimentação referente a P1, mantendo-se P2 fixa em $y2 = 7,8$ mm, valor este escolhido arbitrariamente, é possível controlar a $f_{res(2)}$, Figura 38. Destaque-se ainda que outro efeito observado na Figura 38 é o aumento na atenuação livre (AL) com a diminuição da $f_{res(2)}$.

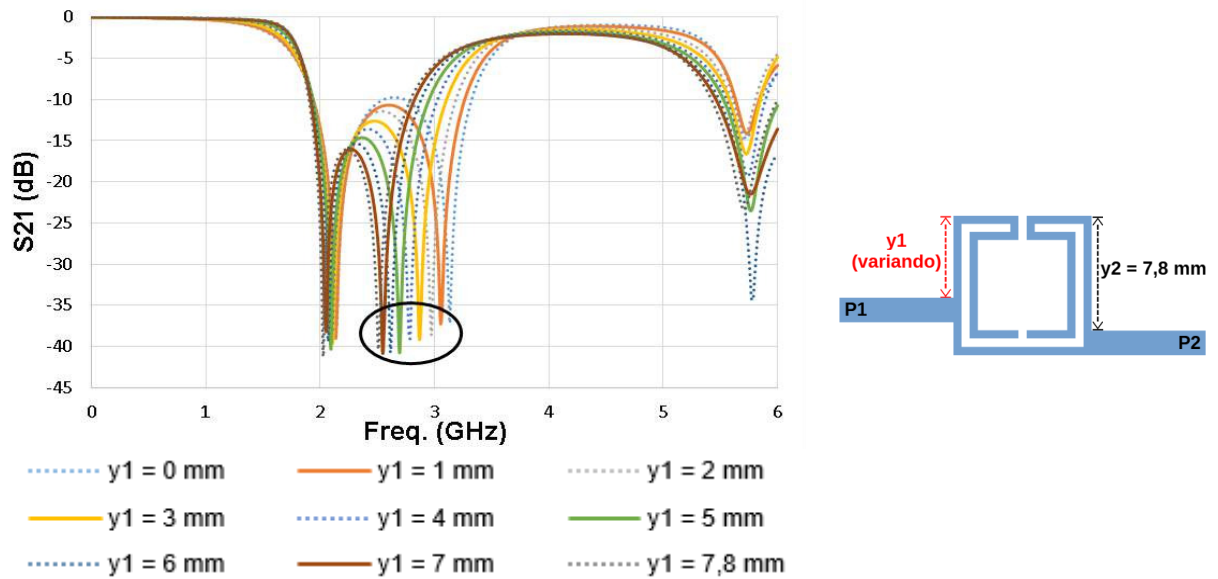


Figura 38 — Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 2 – Análise paramétrica – P1.

Já variando a posição da alimentação referente a P2, mantendo-se a P1 fixa em $y_1 = 0$ mm, valor este escolhido arbitrariamente, observou-se que é possível controlar a $f_{res(1)}$, Figura 39. Ainda, outro efeito observado na Figura 39 é a diminuição na atenuação livre com a diminuição da $f_{res(1)}$.

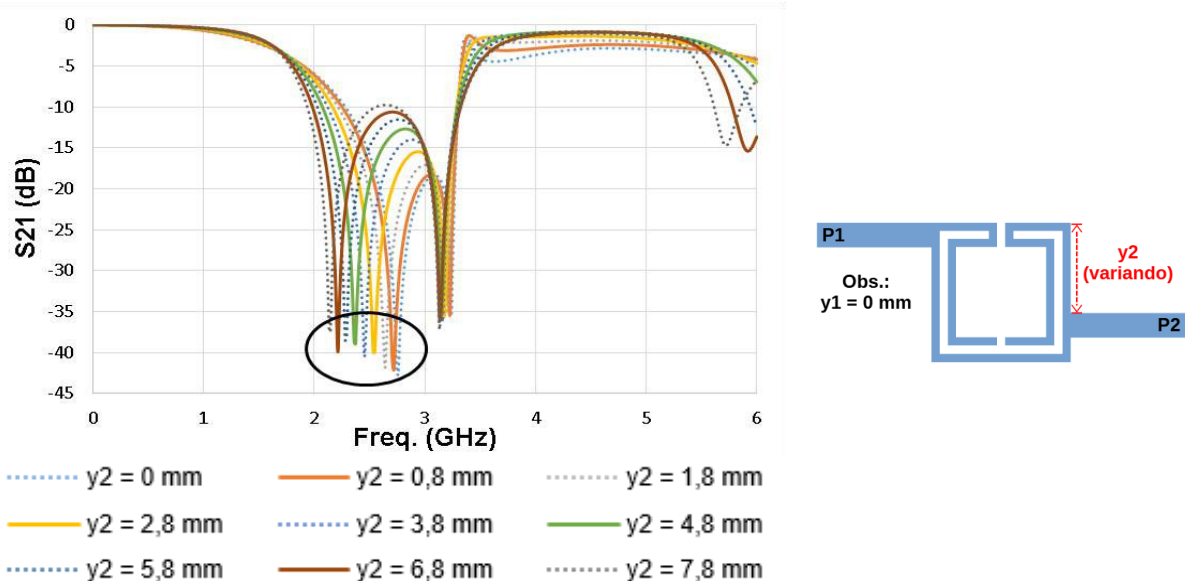


Figura 39 — Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Alimentações assimétricas - Parametrização 2 – Análise paramétrica – P2.

4.2.3 Efeito da alteração das dimensões do ressonador

Escolhendo a parametrização 2 inicialmente com $L_{1e} = 11,6$ mm, $L_{2e} = 7,6$ mm, $dy = 1$ mm, $y_1 = 7,8$ mm e $y_2 = 7,8$ mm, devido a sua maior atenuação livre em comparação com outras configurações assimétricas simuladas variando somente as alimentações, e levando em conta também o potencial de miniaturização, efetuou-se a variação de L_{1e} e L_{2e} , Figura 40. Note-se que conforme é efetuada a variação de L_{1e} e L_{2e} , por consequência y_1 e y_2 também variam.

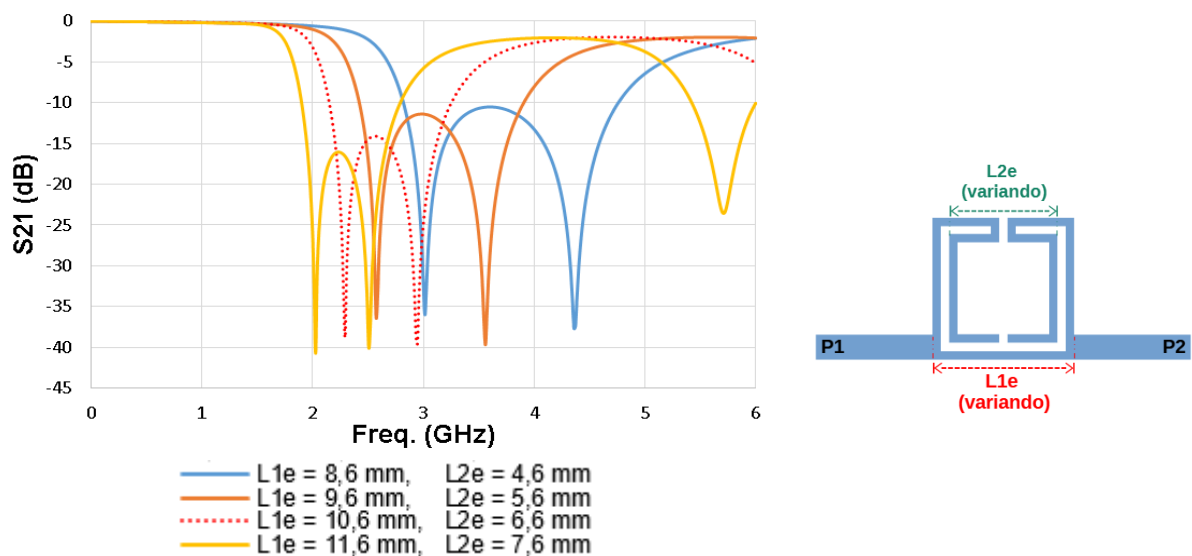


Figura 40 — Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos - Análise paramétrica - L_{1e} e L_{2e} .

Constatou-se que, quanto menor as dimensões do ressonador, maiores são as $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$, sendo o inverso verdadeiro também. Nota-se também que, com o aumento das dimensões, ocorre uma menor BW e uma maior atenuação livre.

Em seguida, será abordado o efeito decorrente da variação das alimentações em filtro representado pela Figura 29 e o efeito decorrente da variação dos parâmetros d e a na atenuação livre de um filtro também representado pela mesma Figura 29.

4.3 FILTRO COM DOIS ANÉIS MATOROSKA EM CASCATA, COM DOIS ANÉIS CONCÊNTRICOS CADA

4.3.1 Parametrização 1 – Frequência de ressonância e atenuação livre (AL)

Com relação à parametrização do filtro com dois anéis matoroska em cascata, com dois anéis concêntricos cada e alimentações assimétricas, representado na Figura 41, foi realizada, como nos casos anteriores, a análise variando somente a alimentação referente a P1, mantendo-se fixa a posição da alimentação referente a P2, e depois efetuou-se o inverso, sempre com $L_{1e} = 11,6$ mm, $L_{2e} = 7,6$ mm, $dy = 1$ mm, $d = 10$ mm e $a = 3,9$ mm. Com essas dimensões de ressonador, para facilitar o entendimento, $y1 = 3,9$ mm ou $y2 = 3,9$ mm são os valores que tornam a alimentação simétrica.

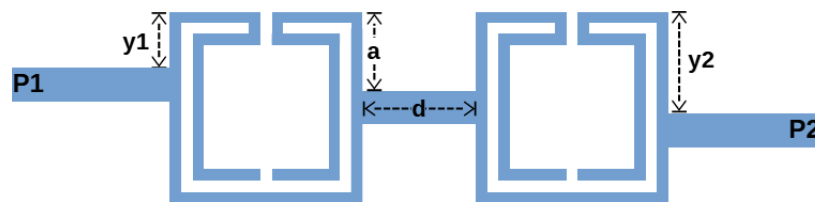


Figura 41 — Filtro com dois anéis matoroska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas - Parametrização 1.

Assim, variando a posição da alimentação referente a P1, mantendo-se a P2 fixa em $y2 = 7,8$ mm, valor este escolhido arbitrariamente, é possível controlar a $f_{res(2)}$, Figura 42.

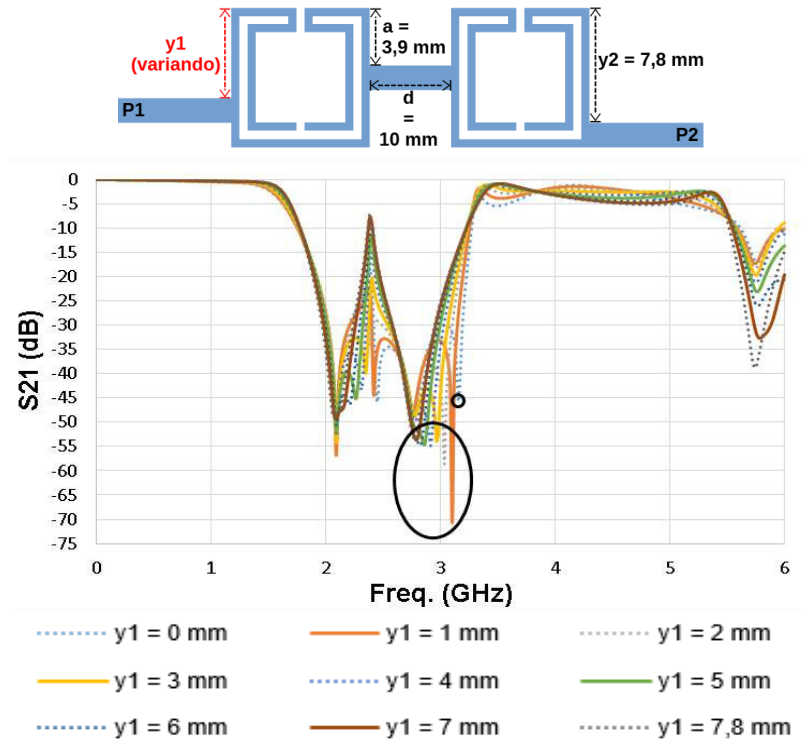


Figura 42 — Filtro com dois anéis matryoshka em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P1.

Com relação a atenuação livre, para os valores de y_1 simulados, ocorre aumento progressivo na atenuação livre de $y_1 = 0 \text{ mm}$ até $y_1 = 2 \text{ mm}$ quando então, até $y_1 = 7.8 \text{ mm}$, a atenuação livre diminui progressivamente, Figura 43.

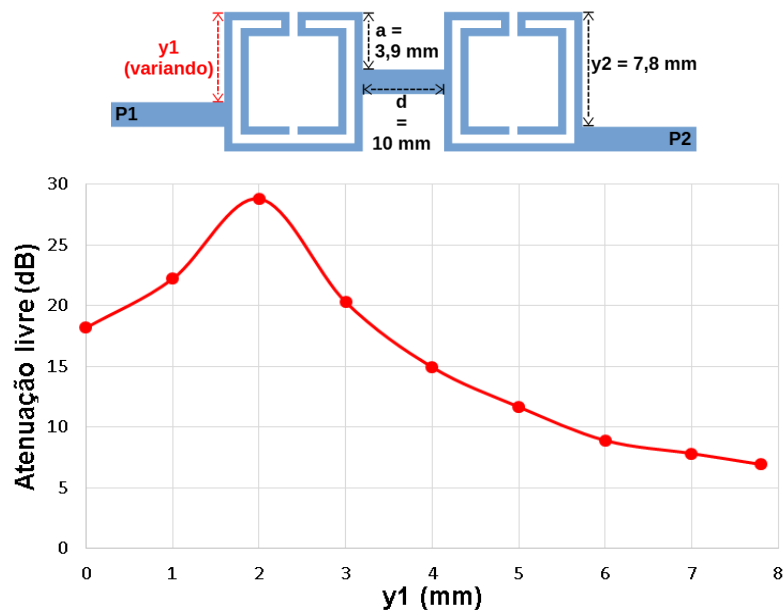


Figura 43 — Filtro com dois anéis matryoshka em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P1 – Atenuação livre.

Já variando a posição da alimentação referente a P2, mantendo-se a P1 fixa em $y_1 = 0$ mm, valor este escolhido arbitrariamente, é possível controlar a $f_{res(1)}$, Figura 44.

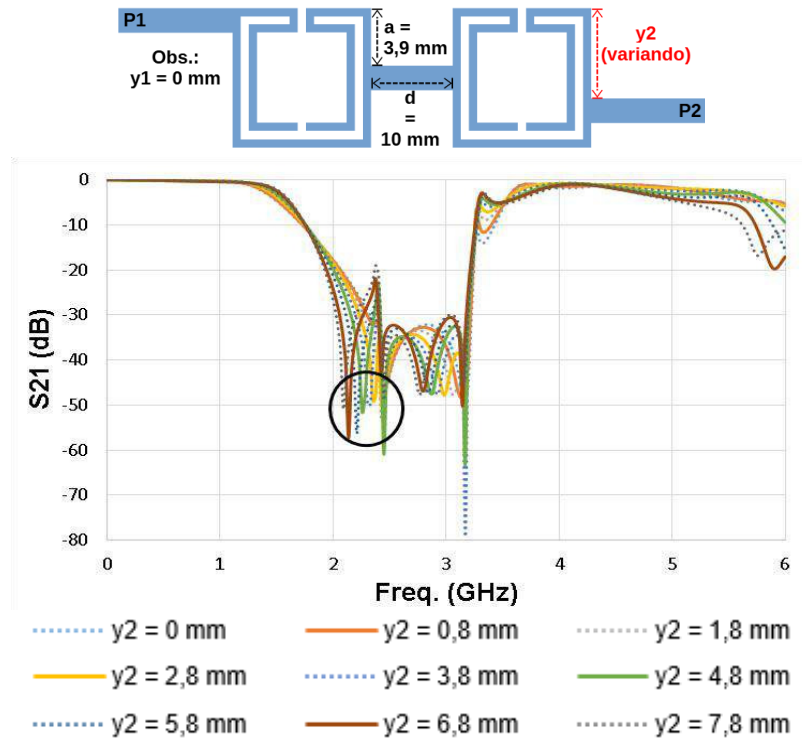


Figura 44 — Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P2.

Com relação a atenuação livre, para os valores de y_2 simulados, ocorre aumento progressivo na atenuação livre de $y_2 = 0$ mm até $y_2 = 2,8$ mm, quando então, até $y_2 = 4,8$ mm, a atenuação livre diminui progressivamente, subindo novamente em $y_2 = 5,8$ mm e enfim decresce progressivamente até $y_2 = 7,8$ mm, Figura 45.

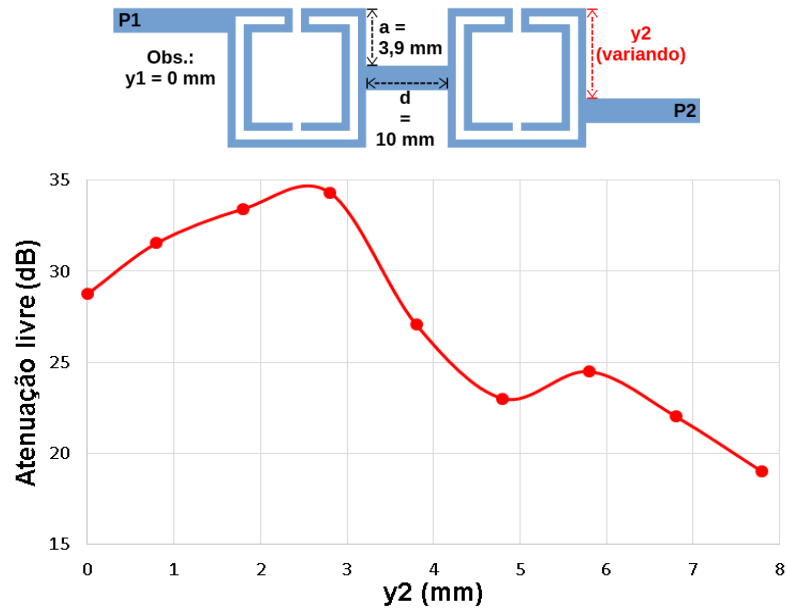


Figura 45 — Filtro com dois anéis matryoska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Alimentações assimétricas - Parametrização 1 – Análise paramétrica – P2 – Atenuação livre.

4.3.2 Efeito da alteração dos parâmetros d e a

Utilizando a parametrização 1 inicialmente com $L_{1e} = 10,6$ mm, $L_{2e} = 6,6$ mm, $dy = 1$ mm, $y_1 = 3$ mm, $y_2 = 6,8$ mm, $d = 10$ mm e $a = 3,4$ mm, devido a suas dimensões reduzidas com relação ao filtro de mesmo tipo com alimentações simétricas construído em [16] e devido à possibilidade de melhora de atenuação por meio da variação dos parâmetros d e a , visto que apresenta um pico em sua banda de rejeição, efetuou-se a variação somente da dimensão d , Figura 46.

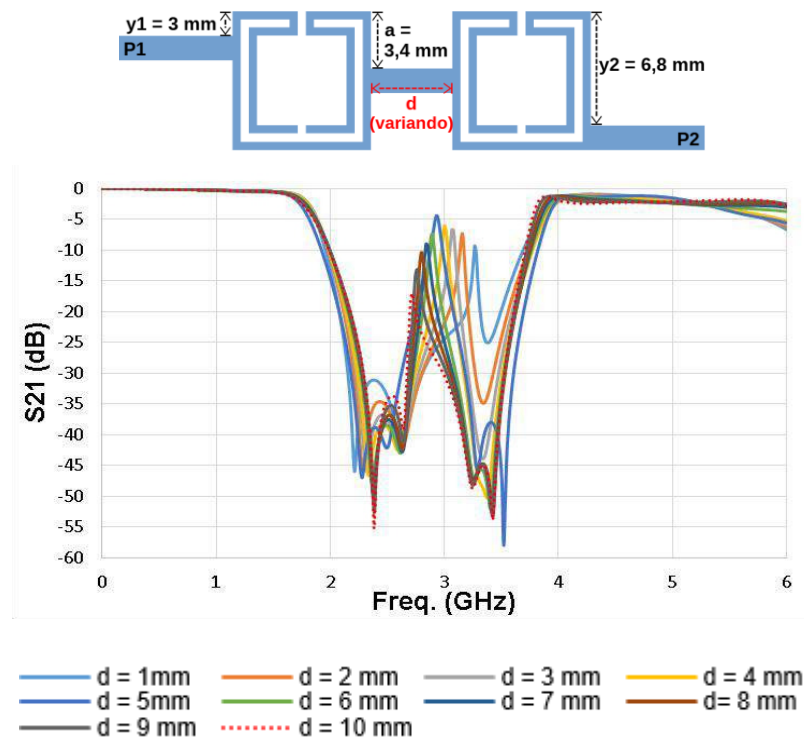


Figura 46 — Filtro com dois anéis matroska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Análise paramétrica - d .

A análise mostrou que o parâmetro d influencia a atenuação livre, Figura 46. Então, com $L_{1e} = 10,6 \text{ mm}$, $L_{2e} = 6,6 \text{ mm}$, $dy = 1 \text{ mm}$, $y_1 = 3 \text{ mm}$, $y_2 = 6,8 \text{ mm}$ e $d = 10 \text{ mm}$, variou-se o parâmetro a , Figura 47.

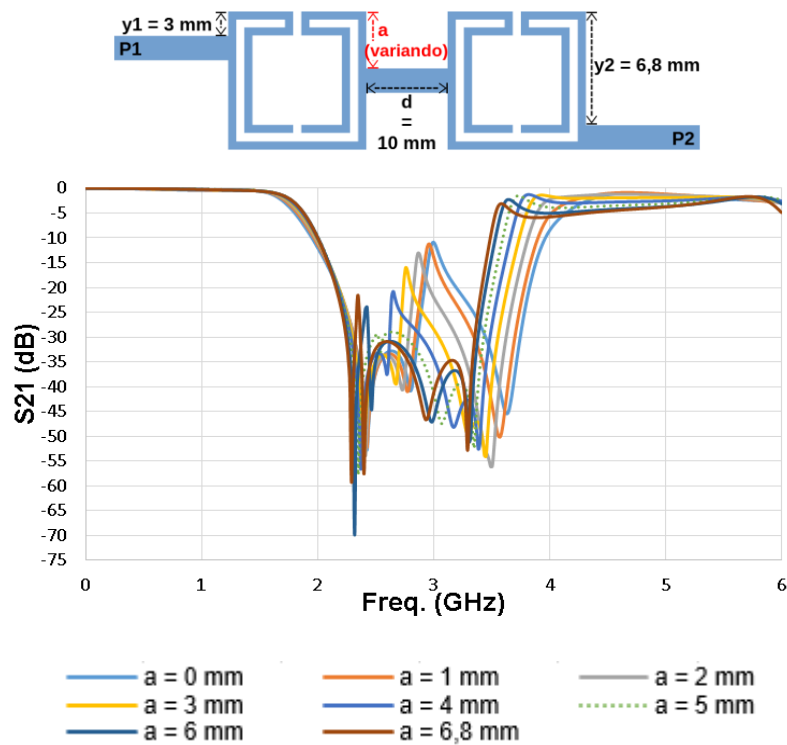


Figura 47 — Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada - Análise paramétrica – a .

Observou-se que o parâmetro a influencia na atenuação livre. Diante disso, é possível para o projetista sintetizar um filtro assimétrico nas geometrias matrioska estudadas neste capítulo ajustando de forma independente $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ por meio da posição das alimentações, com exceção da parametrização 1 do filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos, onde só é possível ajustar a $f_{res(1)}$ em conjunto com a $f_{res(3)}$ quando se varia a alimentação referente a P1. Ainda, para a parametrização 2 do filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e parametrização 1 do filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada, observa-se também impacto na atenuação livre dos filtros quando se efetua o ajuste das frequências de ressonância de forma independente.

Pode-se ainda ajustar de forma conjunta a $f_{res(1)}$ e a $f_{res(2)}$ por meio da alteração das dimensões dos anéis matrioska, no caso da parametrização 2 do filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos. Conjuntamente com esse ajuste, observa-se impacto na BW e atenuação livre.

Especificamente para os filtros com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada, é possível ajustar a atenuação livre por meio da alteração dos parâmetros d e a .

Em acréscimo ao que já foi visto, para as variações de alimentações dos filtros assimétricos apresentadas neste capítulo, foram efetuadas comparações entre as análises referentes ao filtro com um anel do tipo C e filtros matrioska com alimentações assimétricas. O objetivo das comparações é verificar as vantagens dos filtros matrioska com alimentações assimétricas em relação aos filtros tipo C com alimentações assimétricas simulados neste capítulo. Sobressaiu-se nessas comparações o Q , conforme detalhado nos próximos parágrafos.

Assim, a primeira comparação efetuada está representada na Figura 48.

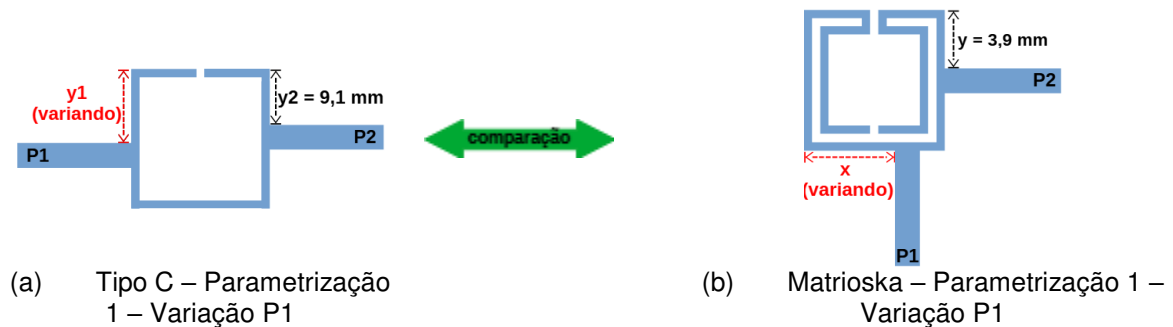


Figura 48 — Primeira comparação de análises de filtros assimétricos.

Para cada posição da alimentação P1 desses filtros, partindo-se da primeira posição até a última, calculou-se os valores de Q , Tabela 4.

Tabela 4 — Primeira comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P1 - Q .

	Tipo C - Figura 48(a) - y_1 (mm)	Matrioska – Figura 48(b) - x (mm)	Q - Tipo C – Figura 48(a)	Q – Matrioska – Figura 48(b)
1ª posição da P1	0	0	0,557	1,272
2ª posição da P1	2,1	1	0,589	1,257
3ª posição da P1	4,4	2	0,791	1,232
4ª posição da P1	6,7	3	0,843	1,209
5ª posição da P1	9,1	4	0,872	1,191
6ª posição da P1	11,3	5	0,929	1,159
7ª posição da P1	13,6	6	1,036	1,132
8ª posição da P1	15,9	7	1,082	1,103
9ª posição da P1	18,2	7,8	1,075	1,077

Comparando-se os valores de Q posição a posição dos dois filtros, constatou-se que todos os valores para o filtro com geometria matrioska são maiores do que os correspondentes para o filtro com um anel do tipo C.

Partindo-se para a segunda comparação efetuada, sua representação pode ser vista na Figura 49.

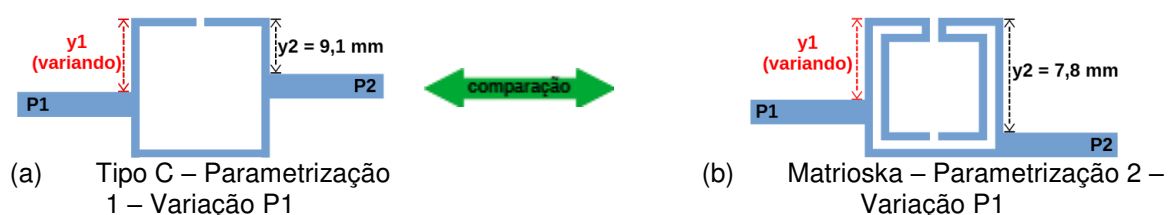


Figura 49 — Segunda comparação de análises de filtros assimétricos.

Aqui também para cada posição da alimentação P1 desses filtros, partindo-se da primeira posição até a última, calculou-se os valores de Q , Tabela 5.

Tabela 5 — Segunda comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P1 - Q.

	Tipo C - Figura 49(a) - y_1 (mm)	Matrioska – Figura 49(b) - y_1 (mm)	Q - Tipo C – Figura 49(a)	Q – Matrioska – Figura 49(b)
1ª posição da P1	0	0	0,557	1,238
2ª posição da P1	2,1	1	0,589	1,278
3ª posição da P1	4,4	2	0,791	1,321
4ª posição da P1	6,7	3	0,843	1,363
5ª posição da P1	9,1	4	0,872	1,417
6ª posição da P1	11,3	5	0,929	1,468
7ª posição da P1	13,6	6	1,036	1,502
8ª posição da P1	15,9	7	1,082	1,515
9ª posição da P1	18,2	7,8	1,075	1,511

Comparando-se os valores de Q posição a posição dos dois filtros, constatou-se que todos os valores para o filtro com geometria matrioska são maiores do que os correspondentes para o filtro com um anel do tipo C.

Tratando agora da terceira comparação efetuada, sua representação pode ser vista na Figura 50.

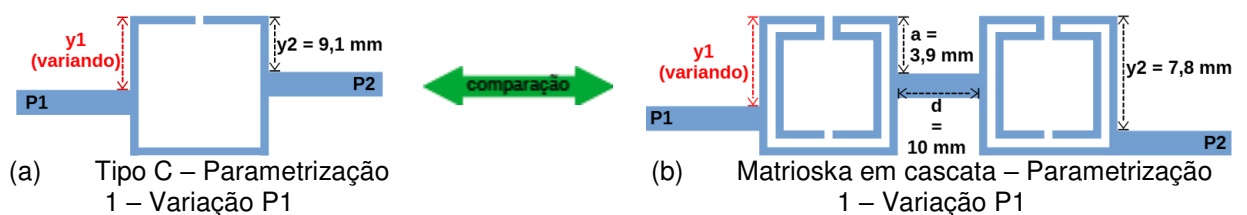


Figura 50 — Terceira comparação de análises de filtros assimétricos.

Neste caso também para cada posição da alimentação P1 desses filtros, partindo-se da primeira posição até a última, calculou-se os valores de Q , Tabela 6.

Tabela 6 — Terceira comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P1 - Q .

	Tipo C - Figura 50(a) - y_1 (mm)	Matrioska em cascata – Figura 50(b) - y_1 (mm)	Q - Tipo C – Figura 50(a)	Q – Matrioska em cascata – Figura 50(b)
1ª posição da P1	0	0	0,557	1,081
2ª posição da P1	2,1	1	0,589	1,300
3ª posição da P1	4,4	2	0,791	1,313
4ª posição da P1	6,7	3	0,843	1,323
5ª posição da P1	9,1	4	0,872	1,337
6ª posição da P1	11,3	5	0,929	1,347
7ª posição da P1	13,6	6	1,036	1,350
8ª posição da P1	15,9	7	1,082	1,356
9ª posição da P1	18,2	7,8	1,075	1,360

Comparando-se os valores de Q posição a posição dos dois filtros, constatou-se que todos os valores para o filtro com geometria matrioska são maiores do que os correspondentes para o filtro com um anel do tipo C.

Em seguida, prosseguiu-se para a quarta comparação efetuada, representada na Figura 51.

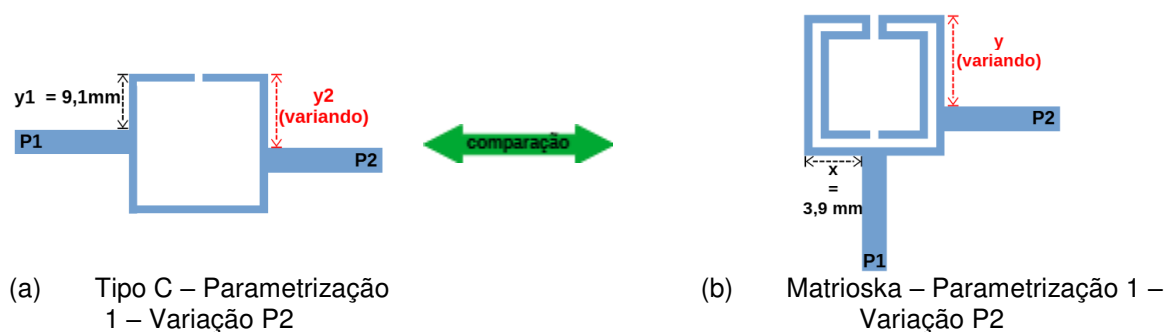


Figura 51 — Quarta comparação de análises de filtros assimétricos.

De forma semelhante as outras comparações, para cada posição da alimentação P2 desses filtros, partindo-se da primeira posição até a última, calculou-se os valores de Q , Tabela 7.

Tabela 7 — Quarta comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P2 - Q .

	Tipo C - Figura 51(a) - y_2 (mm)	Matrioska – Figura 51(b) - y (mm)	Q - Tipo C – Figura 51(a)	Q – Matrioska – Figura 51(b)
1ª posição da P2	0	0	0,555	-
2ª posição da P2	2,1	1	-	-
3ª posição da P2	4,4	2	0,769	-
4ª posição da P2	6,7	3	0,830	-
5ª posição da P2	9,1	4	0,872	1,203
6ª posição da P2	11,3	5	0,880	1,294
7ª posição da P2	13,6	6	0,950	1,379
8ª posição da P2	15,9	7	1,050	1,455
9ª posição da P2	18,2	7,8	1,070	1,492

-: Não foi possível o cálculo, pois não há BW em -3 dB definida no intervalo analisado.

Na Tabela 7, comparando-se os valores de Q posição a posição quando existentes para os dois filtros, constatou-se que todos os valores para o filtro com geometria matrioska são maiores do que os correspondentes para o filtro com um anel do tipo C.

Após, efetuou-se a quinta comparação, representada na Figura 52.



Figura 52 — Quinta comparação de análises de filtros assimétricos.

Para cada posição da alimentação P2 desses filtros, partindo-se da primeira até a última, calculou-se os valores de Q , Tabela 8.

Tabela 8 — Quinta comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P2 - Q .

	Tipo C - Figura 52(a) - y_2 (mm)	Matrioska – Figura 52(b) - y_2 (mm)	Q - Tipo C – Figura 52(a)	Q – Matrioska – Figura 52(b)
1ª posição da P2	0	0	0,555	1,359
2ª posição da P2	2,1	0,8	-	1,367
3ª posição da P2	4,4	1,8	0,769	1,380
4ª posição da P2	6,7	2,8	0,830	1,366
5ª posição da P2	9,1	3,8	0,872	1,353
6ª posição da P2	11,3	4,8	0,880	1,327
7ª posição da P2	13,6	5,8	0,950	1,300
8ª posição da P2	15,9	6,8	1,050	1,264
9ª posição da P2	18,2	7,8	1,070	1,238

-: Não foi possível o cálculo, pois não há BW em -3 dB definida no intervalo analisado.

Comparando os valores de Q posição a posição relacionados na Tabela 8, quando existentes para os dois filtros, constatou-se que todos os valores para o filtro com geometria matrioska são maiores do que os correspondentes para o filtro com um anel do tipo C.

Por fim, efetuou-se a sexta comparação, representada na Figura 53.

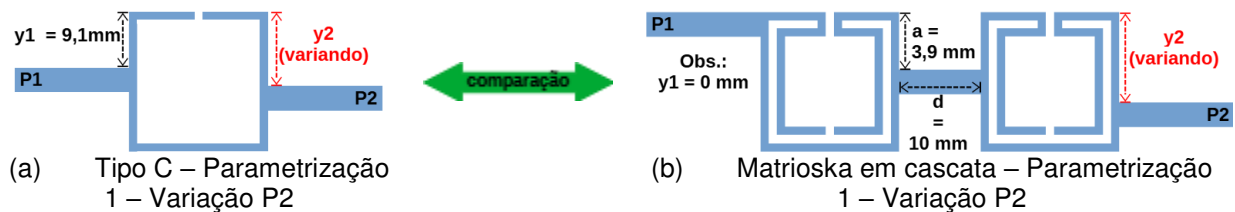


Figura 53 — Sexta comparação de análises de filtros assimétricos.

Assim, para cada posição da alimentação P2 desses filtros, partindo-se da primeira posição até a última, calculou-se os valores de Q , Tabela 9.

Tabela 9 — Sexta comparação - Filtros assimétricos – Tipo C e matrioska – Alimentação P2 - Q .

	Tipo C - Figura 53(a) - y_2 (mm)	Matrioska em cascata – Figura 53(b) - y_2 (mm)	Q - Tipo C – Figura 53(a)	Q – Matrioska em cascata – Figura 53(b)
1ª posição da P2	0	0	0,555	1,034
2ª posição da P2	2,1	0,8	-	1,046
3ª posição da P2	4,4	1,8	0,769	1,063
4ª posição da P2	6,7	2,8	0,830	1,069
5ª posição da P2	9,1	3,8	0,872	1,073
6ª posição da P2	11,3	4,8	0,880	1,071
7ª posição da P2	13,6	5,8	0,950	1,076
8ª posição da P2	15,9	6,8	1,050	1,268
9ª posição da P2	18,2	7,8	1,070	1,080

-: Não foi possível o cálculo, pois não há BW em -3 dB definida no intervalo analisado.

Na comparação dos valores de Q posição a posição relacionados na Tabela 9, quando existentes para os dois filtros, constatou-se que todos os valores para o filtro com geometria matrioska são maiores do que os correspondentes para o filtro com um anel do tipo C.

Diante disso, com base nas simulações realizadas, observou-se que esses filtros matrioska com alimentações assimétricas possuem como vantagem, considerados em conjunto, em relação aos filtros com um anel do tipo C com alimentações assimétricas, a seletividade, por haver uma predominância de valores maiores para o Q , Tabelas 4 à 9. A BW para o cálculo de Q foi definida em -3 dB.

No próximo capítulo, serão abordadas a metodologia utilizada para as simulações, medições e fabricação dos filtros e os resultados alcançados numéricos e experimentais.

5 RESULTADOS

Neste Capítulo, são apresentados os resultados numéricos obtidos a partir das simulações computacionais, bem como os resultados experimentais obtidos a partir das medidas realizadas. Discorre-se ainda sobre a metodologia utilizada e o processo de fabricação dos filtros.

5.1 PARÂMETROS PARA AS SIMULAÇÕES, MEDIÇÕES E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS ALCANÇADOS

O *software* utilizado para as simulações foi o Ansys® *Electronics Desktop* 2018.1.0 (versão comercial), módulo *High-Frequency Structure Simulator (HFSS)* — ANSYS *HFSS* [42], mesmo *software* utilizado nas simulações do Capítulo 4. A versão atual paga do *software* é a 2024 R1.

Foram reproduzidos filtros com um anel do tipo C, com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e com dois anéis matrioska em cascata, cada um com dois anéis concêntricos, todos com alimentação simétrica e ressonadores com lados iguais, constantes em trabalho anterior apresentado em [16].

A partir das reproduções, de acordo com o objetivo desta pesquisa, foram alteradas, inicialmente, apenas as posições das alimentações, de forma que uma ou as duas alimentações ficassem assimétricas, gerando três novos filtros, um deles com utilização na faixa de frequências de 2,4000 *GHz* a 2,4835 *GHz* para aplicações de *Wi-Fi*, e com isso foram verificadas as características das suas respostas em frequência.

Posteriormente, foram gerados dois filtros assimétricos miniaturizados e com utilização na faixa de frequências de 2,4000 *GHz* a 2,4835 *GHz* para aplicações de *Wi-Fi*, sendo comparados com os filtros simétricos que lhe deram origem.

Todos os filtros possuem parâmetros em comum, Tabela 10, podendo ser visualizados na Figura 54.

Tabela 10 — Parâmetros em comum dos filtros.

Parâmetros	Valor
Tangente de perdas do substrato RO3003	0,001
ϵ_r	3,0
h	1,52 mm
W	1 mm
g	1 mm
dy	1 mm
W_0	3,8 mm
Zo da linha de transmissão (P1 e P2)	50 Ω

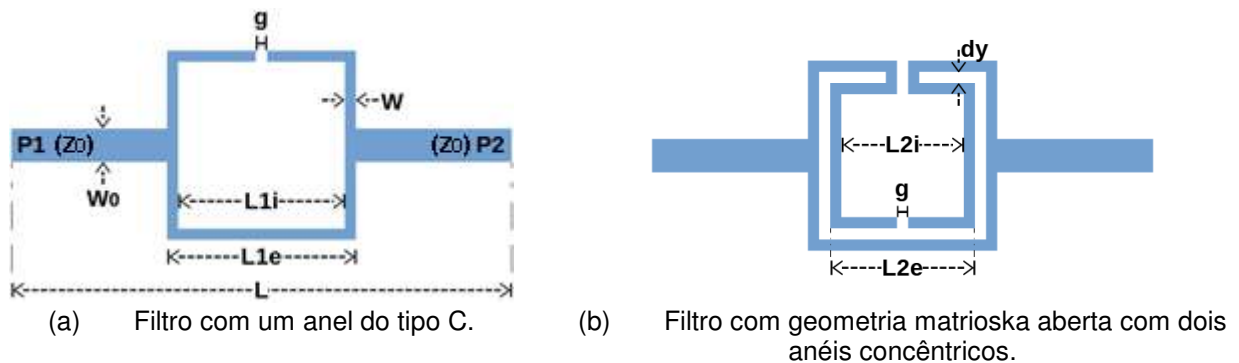


Figura 54 — Representação visual dos parâmetros.

Ainda, foram definidos os seguintes parâmetros para a avaliação dos resultados:

- Largura de banda (BW) definida em -3 dB;
- Primeira faixa de transição (f_{t1}) de -3 dB a -30 dB;
- Segunda faixa de transição (f_{t2}) de -30 dB a -3 dB;
- Primeira frequência de corte (f_{c1}) definida em -3 dB;
- Segunda frequência de corte (f_{c2}) definida em -3 dB;
- Primeira frequência de ressonância, $f_{res(1)}$;
- Segunda frequência de ressonância, $f_{res(2)}$;
- Atenuação livre (AL);
- Área Ocupada dos ressonadores expressa em mm^2 e em múltiplo de

λ_0^2 , Figura 55:

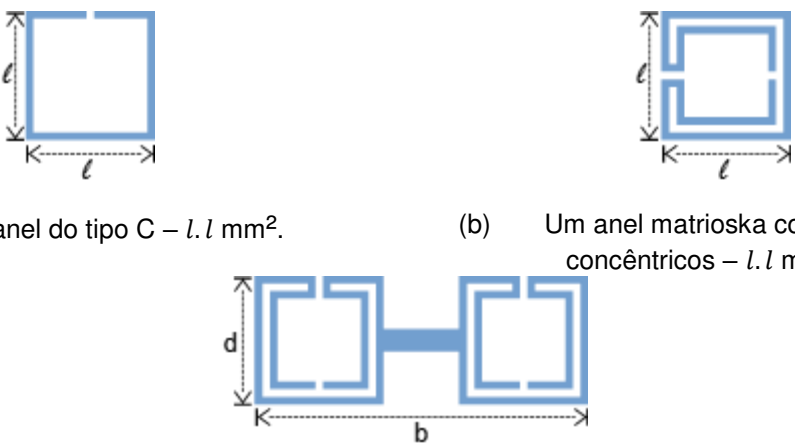
- 
- (a) Um anel do tipo C – $l.l \text{ mm}^2$.
- (b) Um anel matrioska com dois anéis concêntricos – $l.l \text{ mm}^2$.
- (c) Dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada – $b.d \text{ mm}^2$.

Figura 55 — Ressonadores – Área ocupada.

Prosseguindo, os parâmetros de avaliação dos resultados estão representados na Figura 56.

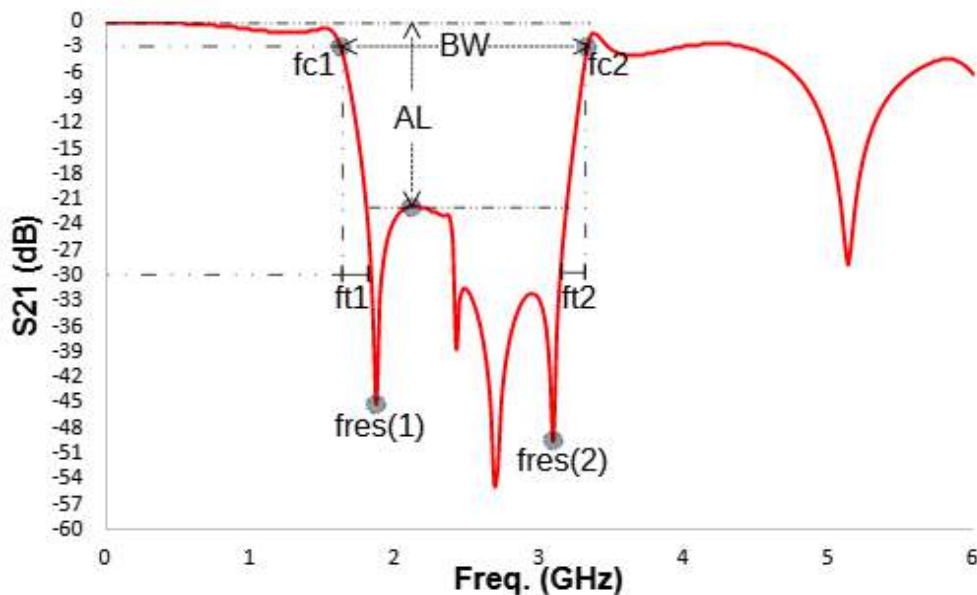


Figura 56 — Parâmetros de avaliação dos resultados.

A distância entre as portas 1 (P1) e 2 (P2) dos filtros é variável, tendo em vista as configurações de alimentações assimétricas que foram utilizadas nas simulações dos filtros.

Foram simulados oito filtros:

- Três filtros com um anel do tipo C, sendo dois com alimentações assimétricas, todos com plano terra de 60 mm x 60 mm, Figura 57;

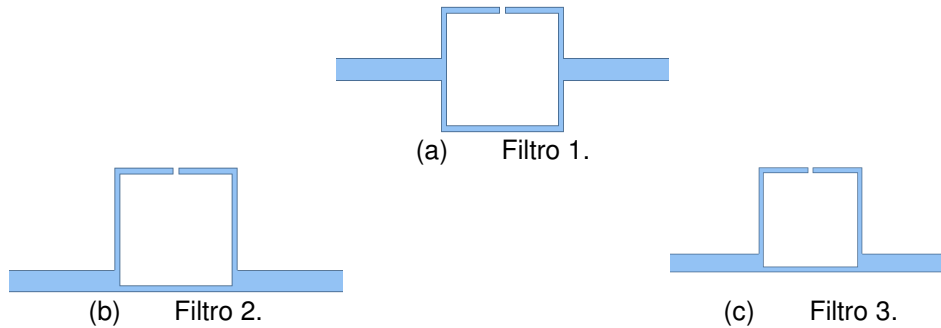


Figura 57 — Filtros com um anel do tipo C.

- Três filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos, sendo dois com alimentações assimétricas, todos com plano terra de 60 mm x 60 mm, Figura 58;

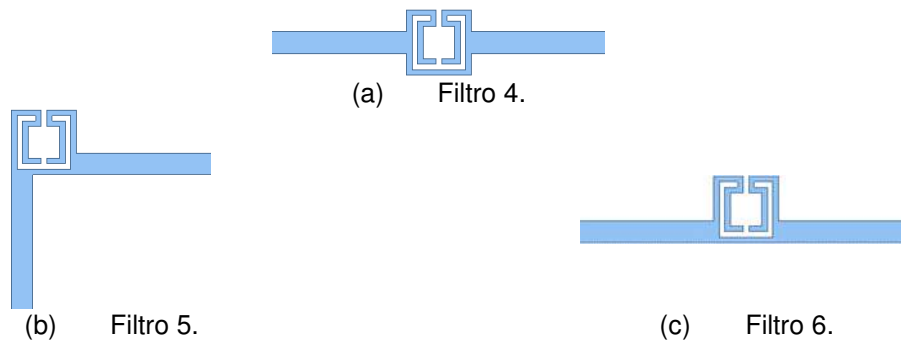


Figura 58 — Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos.

- Dois filtros com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada, dos quais um possui alimentações assimétricas, todos com plano terra de 60 mm x 60 mm, Figura 59.



Figura 59 — Filtros com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada.

Dos filtros simulados, foram fabricados cinco, Figura 60, que são os filtros com alimentações assimétricas, pois os filtros com alimentação simétrica já foram fabricados anteriormente em [16], onde constam seus resultados medidos.

Para a fabricação dos filtros, Figura 60, seus leiautes foram exportados como arquivos .dxf a partir do *software* Ansys® *Electronics Desktop* 2018.1.0 e foram impressos em gráfica na placa com o substrato RO3003.

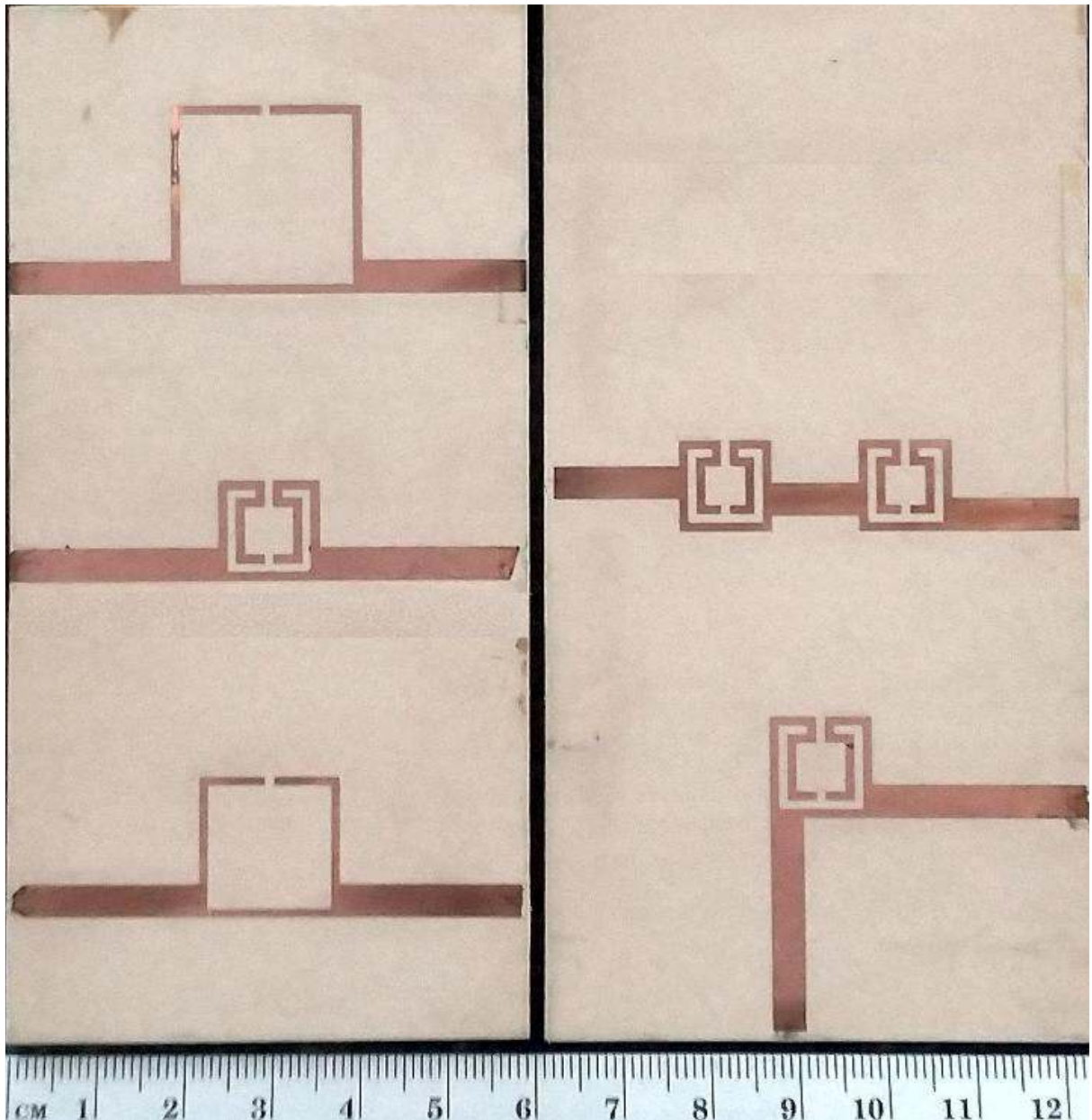


Figura 60 — Filtros assimétricos fabricados.

As medições dos filtros foram realizadas utilizando um analisador de redes Agilent E5071C, Figura 61.

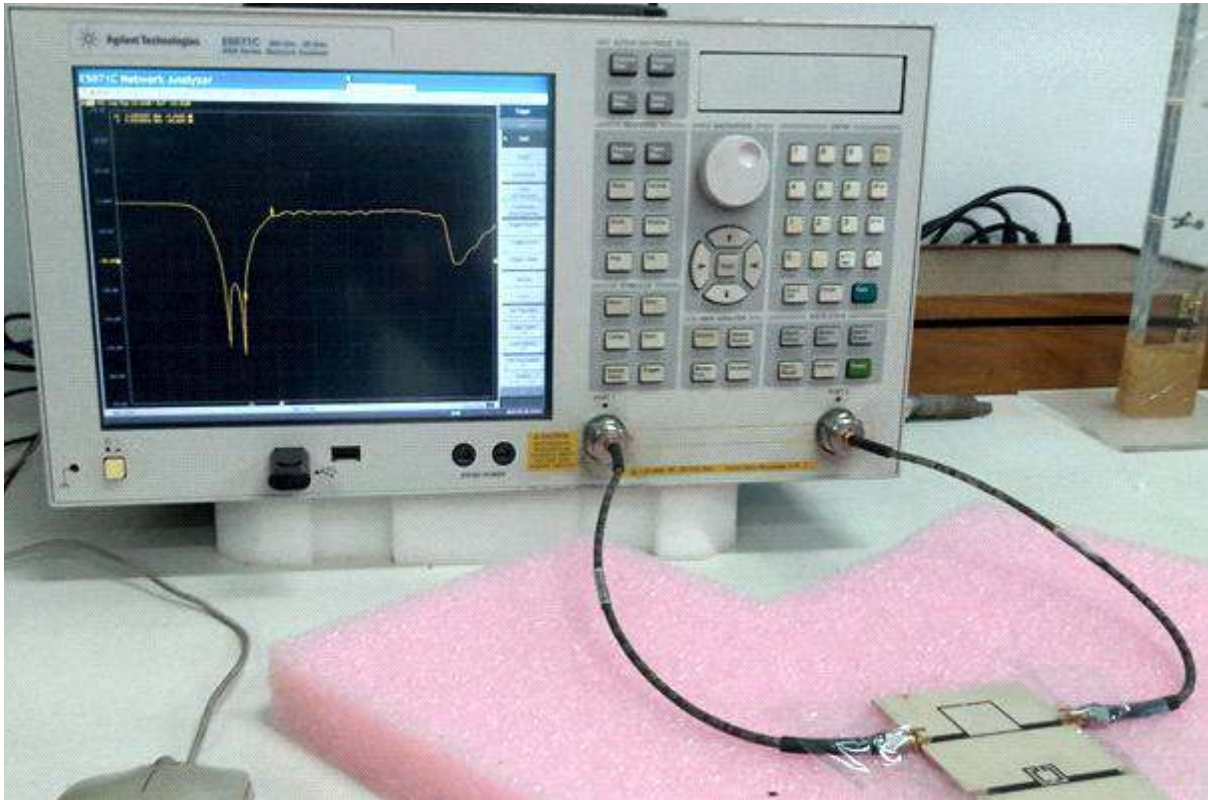


Figura 61 — Medição de um dos filtros fabricados nesta dissertação com o analisador de redes Agilent E5071C.

Na próxima subseção, serão abordadas as simulações, medições e avaliação dos resultados alcançados dos filtros.

5.2 SIMULAÇÕES, MEDIÇÕES E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS ALCANÇADOS

5.2.1 Filtros com um anel do tipo C

Inicialmente reproduziu-se o filtro com um anel do tipo C, com alimentações simétricas (filtro 1) e $L_{1e} = 22$ mm, sendo que a Figura 62 mostra a curva original medida e apresentada em [16] e a curva reproduzida (simulada) nesta dissertação (Filtro 1).

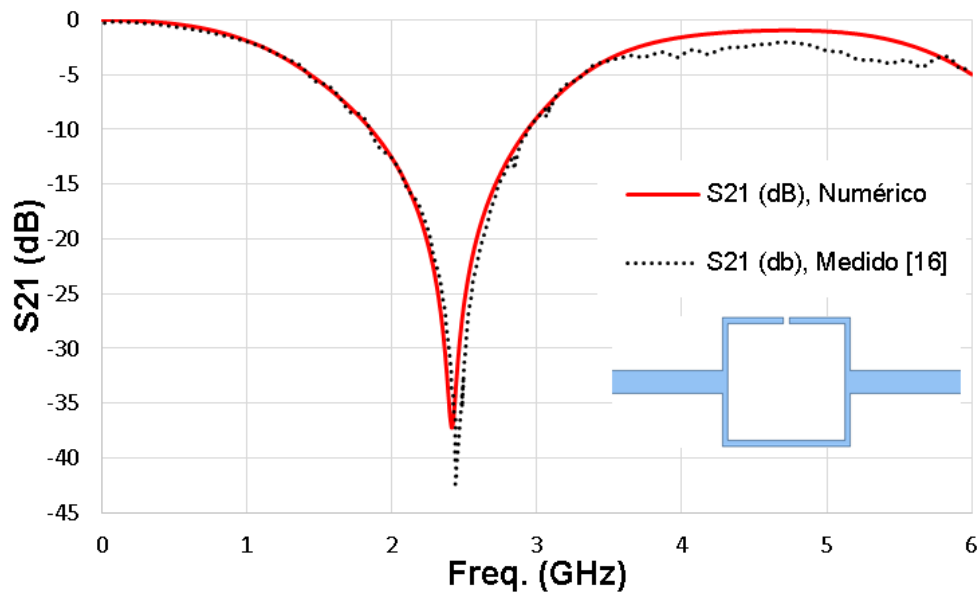


Figura 62 — S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com um anel do tipo C e alimentações simétricas - Filtro 1.

A frequência de ressonância para o filtro 1 obtida por meio da simulação ficou em 2,413 GHz, igual a calculada por meio das equações (6) e (7), sendo que o resultado da frequência de ressonância medida em [16] foi de 2,461 GHz, uma diferença de 1,99% com relação ao valor simulado neste trabalho.

A Tabela 11 apresenta os dados simulados nesta dissertação e os dados medidos apresentados em [16].

Tabela 11 — Filtro com um anel do tipo C - Dados medidos em [16] e simulados nesta dissertação.

	f_{res} (GHz)	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	f_{t1} (GHz)	f_{t2} (GHz)	BW (GHz)	AL (dB)	Q	λ_0 (mm)	Área ocupada (mm ²)	Área ocupada - λ_0^2 (mm ²)
Filtro 1 medido em [16]	2,461	1,171	3,821	1,230	1,301	2,650	42,150	0,798	141,826	484	$0,0241\lambda_0^2$
Filtro 1 - simulado	2,413	1,191	3,588	1,172	1,126	2,397	37,243	0,862	145,124	484	$0,0230\lambda_0^2$

Após uma análise paramétrica, foi escolhida uma configuração de alimentações assimétricas, Figura 63, devido a sua maior atenuação livre em comparação com outras configurações assimétricas simuladas e levando em conta também o potencial de miniaturização com relação ao filtro 1 (quanto menor a

frequência nas simulações, maior o potencial de miniaturização), sendo que essa configuração foi utilizada nos filtros 2 e 3, que possuem dimensões dos ressonadores diferentes.



Figura 63 — Filtros com um anel do tipo C e alimentações assimétricas.

Assim, foi projetado e simulado o filtro 2, com $L_{1e} = 22$ mm, $y_1 = 18,2$ mm e $y_2 = 18,2$ mm. A resposta em frequência simulada e medida do filtro 2 com alimentações assimétricas é apresentada na Figura 64.

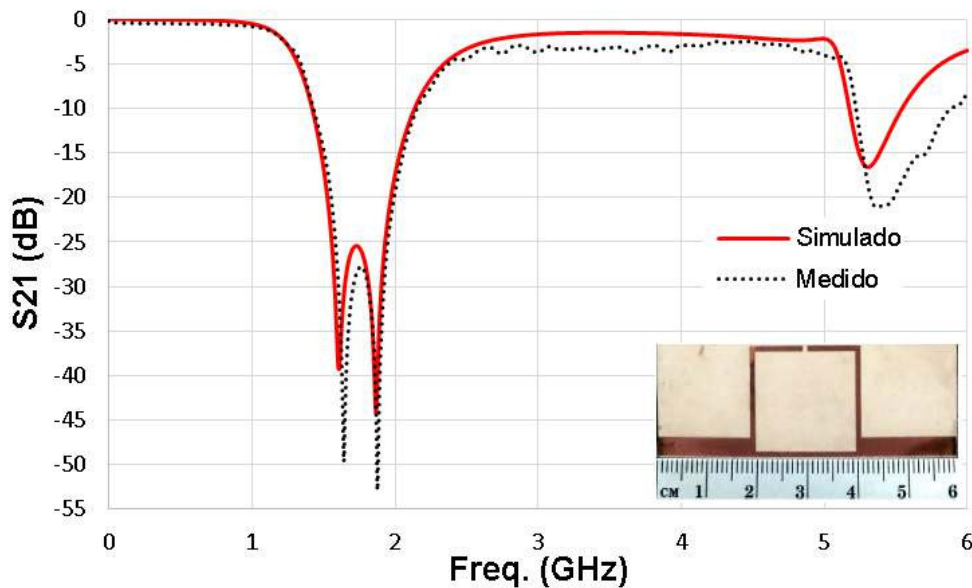


Figura 64 — S_{21} (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com um anel do tipo C e alimentações assimétricas - Filtro 2.

Os resultados simulados e medidos apresentam boa concordância. A Tabela 12 apresenta os dados simulados e medidos do filtro 2.

Tabela 12 — Resultado simulado e medido – Filtro 2.

	$f_{res(1)}$ (GHz)	$f_{res(2)}$ (GHz)	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	f_{t1} (GHz)	f_{t2} (GHz)	BW (GHz)	AL (dB)	Q	λ_0 (mm)	Área ocupada (mm ²)	Área ocupada - λ_0^2 (mm ²)
Filtro 2 - simulado	1,609	1,867	1,252	2,544	0,325	0,640	1,292	25,427	1,381	168,097	484	0,0171 λ_0^2
Filtro 2 - medido	1,645	1,879	1,266	2,823	0,341	0,898	1,557	27,701	1,214	158,690	484	0,0192 λ_0^2

Na sequência, foi efetuada a adaptação do filtro 2 para utilização na faixa de frequências de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz para aplicações de *Wi-Fi*, de forma a ser comparado de forma mais direta com o filtro 1 medido, com utilização também na referida faixa.

A adaptação consistiu na diminuição de L_{1e} até se encontrar o menor valor com utilização na faixa de frequências de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz para aplicações de *Wi-Fi*, valor este igual a 16 mm. A resposta em frequência simulada e medida desse filtro, denominado filtro 3, é apresentada na Figura 65.

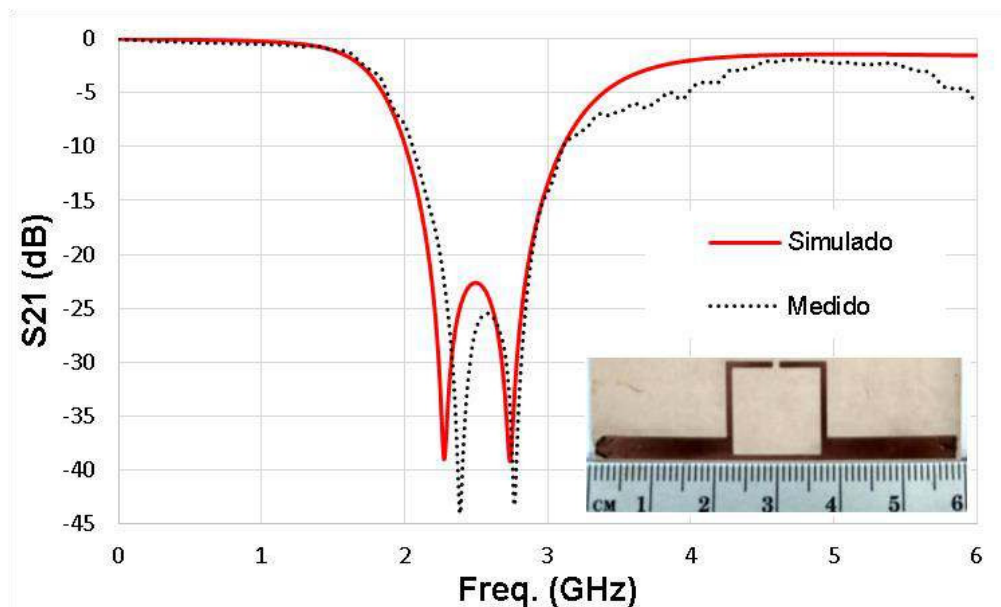


Figura 65 — S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com um anel do tipo C e alimentações assimétricas - Filtro 3.

Os resultados simulados e medidos apresentam concordância. A Tabela 13 apresenta os dados simulados e medidos do filtro 3.

Tabela 13 — Resultado simulado e medido – Filtro 3.

	$f_{res(1)}$ (GHz)	$f_{res(2)}$ (GHz)	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	f_{t1} (GHz)	f_{t2} (GHz)	BW (GHz)	AL (dB)	Q	λ_0 (mm)	Área ocupada (mm ²)	Área ocupada - λ_0^2 (mm ²)
Filtro 3 - simulado	2,275	2,737	1,738	3,656	0,500	0,873	1,918	22,627	1,314	119,013	256	0,0181 λ_0^2
Filtro 3 - medido	2,383	2,767	1,777	4,260	0,554	1,447	2,483	25,485	1,108	109,037	256	0,0215 λ_0^2

A figura 66 apresenta as respostas medidas dos filtros 1 a 3 consolidadas.

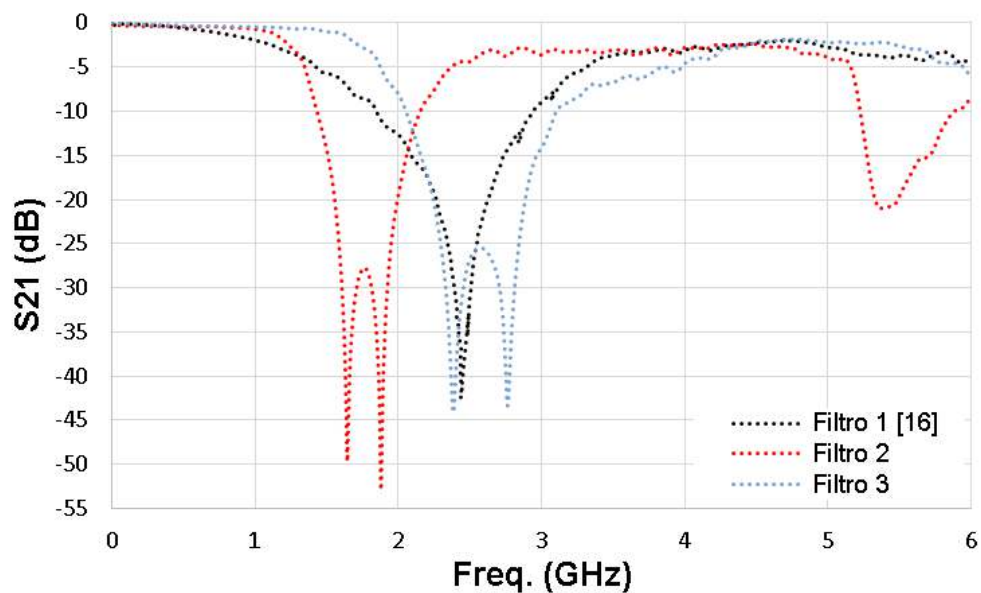


Figura 66 — S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtros com um anel do tipo C - Respostas consolidadas.

A Tabela 14 apresenta um resumo dos resultados medidos dos filtros 1 a 3.

Tabela 14 — Filtros com um anel do tipo C - Resultados das medições.

	f_{res} (GHz)	$f_{res(1)}$ (GHz)	$f_{res(2)}$ (GHz)	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	f_{t1} (GHz)	f_{t2} (GHz)	BW (GHz)	AL (dB)	Q	λ_0 (mm)	Área ocupada (mm ²)	Área ocupada - λ_0^2 (mm ²)
Filtro 1 medido em [16]	2,461	-	-	1,171	3,821	1,230	1,301	2,650	42,150	0,798	141,826	484	$0,0241\lambda_0^2$
Filtro 2 - medido	-	1,645	1,879	1,266	2,823	0,341	0,898	1,557	27,701	1,214	158,690	484	$0,0192\lambda_0^2$
Filtro 3 - medido	-	2,383	2,767	1,777	4,260	0,554	1,447	2,483	25,485	1,108	109,037	256	$0,0215\lambda_0^2$

Comparando os dados medidos dos filtros 1 e 2, o primeiro sendo o filtro com alimentações simétricas reproduzido e o segundo sendo o filtro com alimentações assimétricas de mesma área ocupada, tomando por base de comparação a f_{res} do filtro 1, a $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ do filtro 2 são, respectivamente, 33,16% e 23,65% menores, indicando que houve miniaturização com relação ao filtro 1. Comparadas as f_{t1} e f_{t2} do filtro 1, as f_{t1} e f_{t2} do filtro 2 são, respectivamente, 72,28% e 30,98% menores, indicando que o filtro 2 é mais seletivo. A BW do filtro 2 é 41,25% menor e o Q do filtro 2 é 52,13% maior, ocorrendo ainda menos atenuação livre no filtro 2 na banda de rejeição.

Da mesma forma, comparando os dados medidos dos filtros 1 e 3, o primeiro sendo o filtro com alimentações simétricas reproduzido e o segundo o filtro com alimentações assimétricas miniaturizado, ambos fabricados com a intenção de utilização na faixa de frequências de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz para aplicações de *Wi-Fi*, mesmo tendo áreas ocupadas diferentes, tomando por base de comparação a f_{res} do filtro 1, a $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ do filtro 3 são, respectivamente, 3,17% menor e 12,43% maior. Já com relação a faixa de transição, a f_{t1} e a f_{t2} do filtro 3 são, respectivamente, 54,96% menor e 11,22% maior do que os valores correspondentes para o filtro 1. A BW do filtro 3, por sua vez, é 6,30% menor e o Q do filtro 3 é 38,85% maior, ocorrendo ainda menos atenuação livre no filtro 3 na banda de rejeição. Ainda, confirmou-se que houve miniaturização no filtro 3 com relação ao filtro 1, pois a área ocupada do filtro 3 é 47,11% menor.

Pelos resultados obtidos, em seu conjunto os filtros 2 e 3 possuem como desvantagem em relação ao filtro 1 a BW e uma atenuação livre menor, mas em contrapartida possuem como vantagens a miniaturização e a seletividade.

5.2.2 Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos

Inicialmente reproduziu-se o filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e alimentações simétricas (filtro 4), com $L_{1e} = 11,6$ mm, $L_{2e} = 7,6$ mm e $dy = 1$ mm, conforme projetado em [16], sendo que a Figura 67 mostra a curva original medida e a curva reproduzida (simulada) nesta dissertação (Filtro 4).

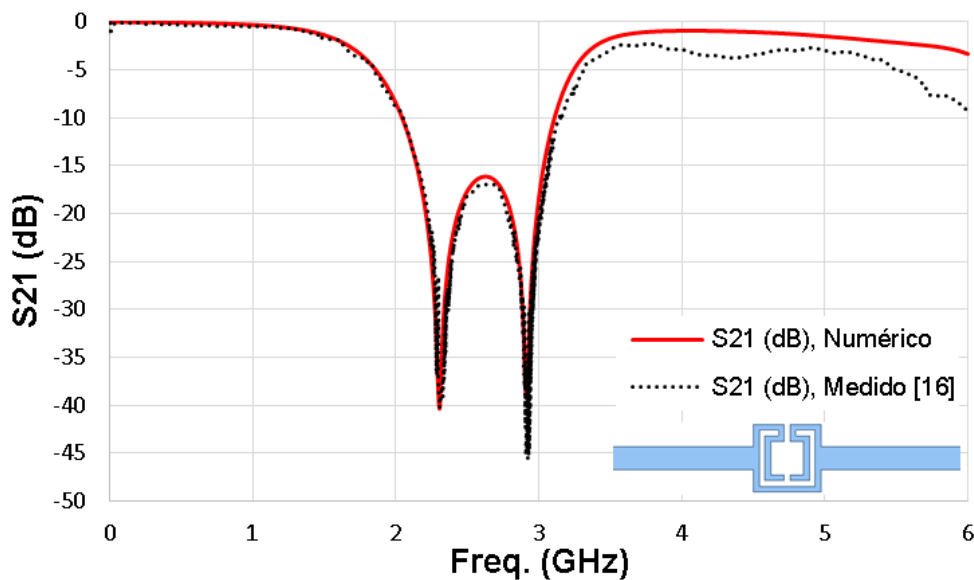


Figura 67 — S21 (dB) x Freq. (GHz) – Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e alimentações simétricas – Geometria matrioska aberta - Filtro 4.

A $f_{res(1)}$ simulada para o filtro 4 é 2,307 GHz, enquanto a calculada por meio das Equações (8) e (9) é 2,149 GHz, uma diferença de 6,85%. Já a $f_{res(2)}$ simulada para o mesmo filtro é 2,920 GHz, enquanto a calculada por meio das Equações (8) e (10) é 2,911 GHz, uma diferença de 0,31%. O resultado da $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ medidas em [16] foi de 2,321 GHz e 2,931 GHz, uma diferença de 0,61% e 0,38%, respectivamente, com relação aos valores simulados nesta dissertação.

A Tabela 15 apresenta os dados simulados nesta dissertação e os dados medidos apresentados em [16].

Tabela 15 — Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos – Geometria matrioska aberta - Dados medidos em [16] e simulados nesta dissertação.

	$f_{res(1)}$ (GHz)	$f_{res(2)}$ (GHz)	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	f_{t1} (GHz)	f_{t2} (GHz)	BW (GHz)	AL (dB)	Q	λ_0 (mm)	Área ocupada (mm ²)	Área ocupada - λ_0^2 (mm ²)
Filtro 4 medido em [16]	2,321	2,931	1,681	3,480	0,610	0,535	1,799	16,870	1,344	124,036	134,56	0,0088 λ_0^2
Filtro 4 - simulado	2,307	2,920	1,722	3,351	0,551	0,412	1,629	16,128	1,475	124,887	134,56	0,0086 λ_0^2

Comparando o filtro 4 simulado com o filtro com um anel do tipo C simulado (filtro 1), observa-se uma maior seletividade e uma menor área ocupada no filtro 4.

Após uma análise paramétrica, foram escolhidas duas configurações de alimentações assimétricas, Figura 68, devido a sua maior atenuação livre em comparação com outras configurações assimétricas simuladas e levando em conta também o potencial de miniaturização com relação ao filtro 4 (quanto menor a frequência nas simulações, maior o potencial de miniaturização).



Figura 68 — Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta.

A resposta em frequência simulada do filtro 5, com $L_{1e} = 11,6$ mm, $L_{2e} = 7,6$ mm, $dy = 1$ mm, $x = 0$ mm, $y = 7,8$ mm e alimentações assimétricas é mostrada na Figura 69.

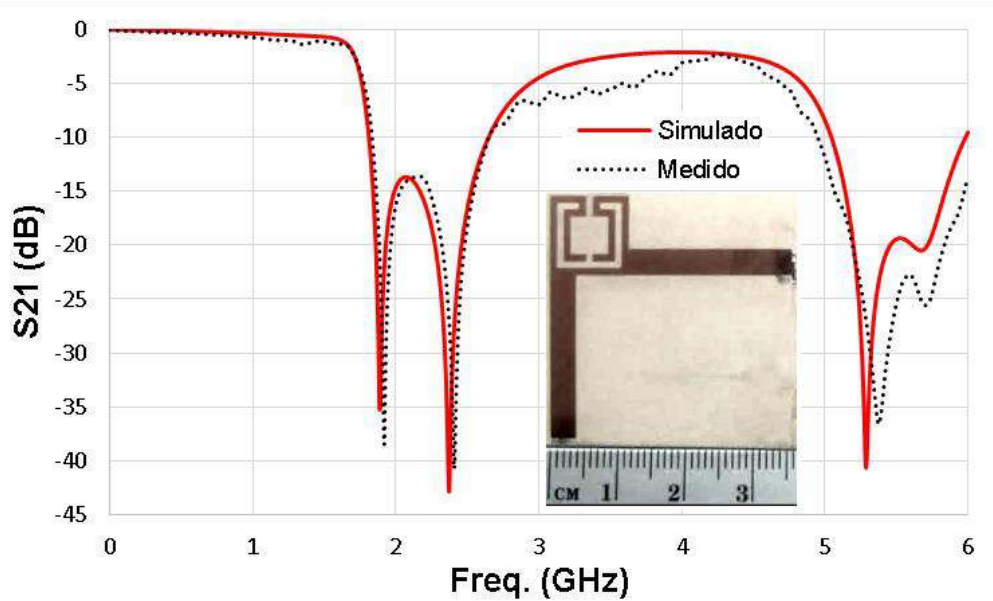


Figura 69 — S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta - Filtro 5.

Verifica-se que os resultados simulados e medidos concordam. A Tabela 16 apresenta o resultado simulado e medido do filtro 5.

Tabela 16 — Resultado simulado e medido – Filtro 5.

	$f_{res(1)}$ (GHz)	$f_{res(2)}$ (GHz)	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	f_{t1} (GHz)	f_{t2} (GHz)	BW (GHz)	AL (dB)	Q	λ_0 (mm)	Área ocupada (mm ²)	Área ocupada - λ_0^2 (mm ²)
Filtro 5 - simulado	1,885	2,371	1,726	3,276	0,153	0,877	1,550	13,659	1,534	126,162	134,56	0,0085 λ_0^2
Filtro 5 - medido	1,921	2,407	1,730	4,017	0,177	1,586	2,287	13,621	1,153	113,801	134,56	0,0104 λ_0^2

Comparando com os filtros com um anel do tipo C com alimentações assimétricas em seu conjunto (filtros 2 e 3 medidos), a vantagem do filtro 5 medido é a rápida transição da banda passante para a banda de rejeição.

Logo após, foi projetado, simulado e medido o filtro 6. A resposta em frequência simulada e medida do filtro 6 com $L_{1e} = 11,6$ mm, $L_{2e} = 7,6$ mm, $dy = 1$ mm, $y1 = 7,8$ mm, $y2 = 7,8$ mm e alimentações assimétricas pode ser vista na Figura 70.

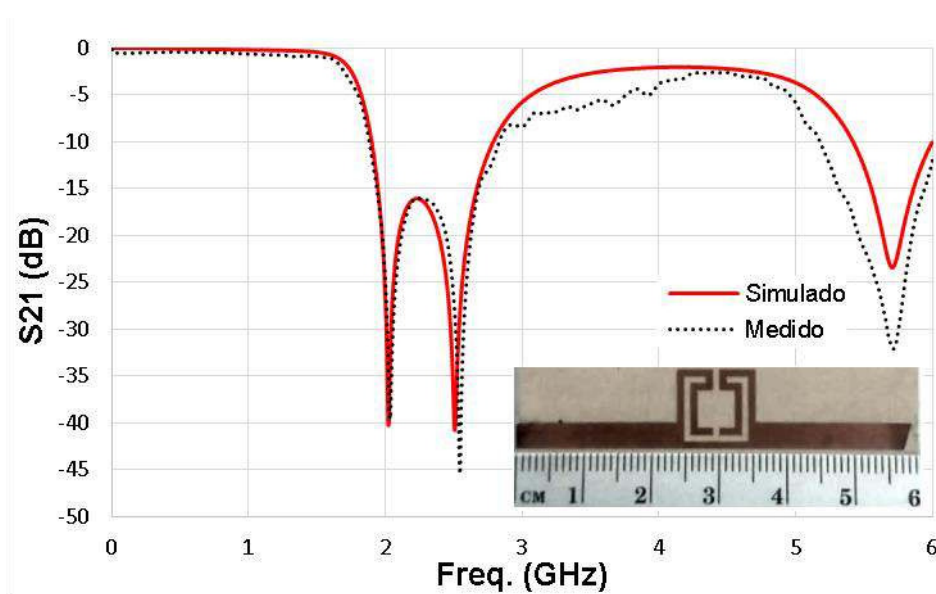


Figura 70 — S_{21} (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta - Filtro 6.

Os resultados simulados e medidos apresentam concordância. A Tabela 17 apresenta o resultado simulado e medido do filtro 6.

Tabela 17 — Resultado simulado e medido – Filtro 6.

	$f_{res(1)}$ (GHz)	$f_{res(2)}$ (GHz)	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	f_{t1} (GHz)	f_{t2} (GHz)	BW (GHz)	AL (dB)	Q	λ_0 (mm)	Área ocupada (mm ²)	Área ocupada - λ_0^2 (mm ²)
Filtro 6 - simulado	2,023	2,509	1,772	3,395	0,237	0,855	1,623	16,065	1,511	122,312	134,56	0,0090 λ_0^2
Filtro 6 - medido	2,035	2,545	1,719	4,201	0,293	1,630	2,482	15,988	1,083	111,637	134,56	0,0108 λ_0^2

Realizada a comparação com os filtros com um anel do tipo C com alimentações assimétricas (filtros 2 e 3 medidos), a vantagem do filtro 6 medido também é a rápida transição da banda passante para a banda de rejeição.

A Figura 71 apresenta as respostas medidas dos filtros 4 a 6 consolidadas.

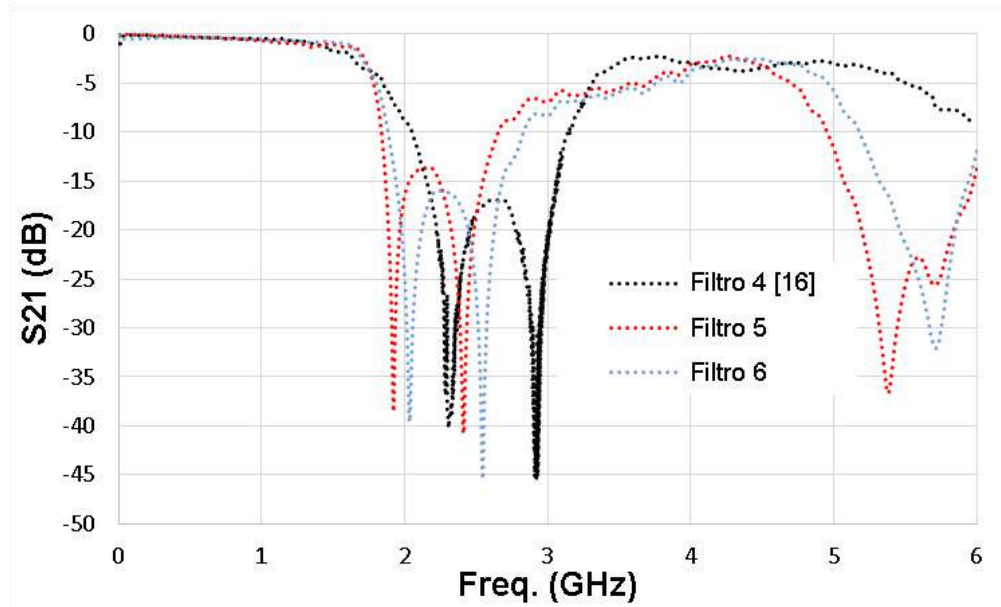


Figura 71 — S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos – Geometria matrioska aberta - Respostas consolidadas.

A Tabela 18 apresenta um resumo dos resultados obtidos nas medições para os filtros 4 a 6.

Tabela 18 — Filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos – Geometria matrioska aberta - Resultados das medições.

	$f_{res(1)}$ (GHz)	$f_{res(2)}$ (GHz)	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	f_{t1} (GHz)	f_{t2} (GHz)	BW (GHz)	AL (dB)	Q	λ_0 (mm)	Área ocupada (mm ²)	Área ocupada - λ_0^2 (mm ²)
Filtro 4 medido em [16]	2,321	2,931	1,681	3,480	0,610	0,535	1,799	16,870	1,344	124,036	134,56	0,0088 λ_0^2
Filtro 5 - medido	1,921	2,407	1,730	4,017	0,177	1,586	2,287	13,621	1,153	113,801	134,56	0,0104 λ_0^2
Filtro 6 - medido	2,035	2,545	1,719	4,201	0,293	1,630	2,482	15,988	1,083	111,637	134,56	0,0108 λ_0^2

Comparando-se os dados medidos dos filtros 4 e 5, o primeiro sendo o filtro com alimentações simétricas medido e o segundo sendo um filtro com alimentações assimétricas de mesma área ocupada, as $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ do filtro 5 são, respectivamente, 17,23% e 17,88% menores, indicando que houve miniaturização do filtro 5 com relação ao 4. A f_{t1} do filtro 5 é 70,98% menor e a f_{t2} do filtro 5 é

196,45% maior. A BW do filtro 5 é 26,13% maior, ocorrendo ainda uma menor atenuação livre no filtro 5 na banda de rejeição. Ainda, o Q do filtro 5 é 14,21% menor.

Continuando, comparando-se os dados medidos dos filtros 4 e 6, o primeiro sendo o filtro com alimentações simétricas medido e o segundo sendo um outro filtro com alimentações assimétricas de mesma área ocupada, as $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ do filtro 6 são, respectivamente, 12,32% e 13,17% menores, também indicando que houve miniaturização do filtro 6 com relação ao 4. A f_{t1} do filtro 6 é 51,97% menor e a f_{t2} do filtro 6 é 204,67% maior. A BW do filtro 6 é 37,97% maior, ocorrendo ainda uma menor atenuação livre no filtro 6 na banda de rejeição. O Q do filtro 6, por sua vez, é 19,42% menor.

Pelos resultados obtidos, os filtros 5 e 6, em seu conjunto, possuem como desvantagens em relação ao filtro 4 a seletividade e as menores atenuação livre, e como vantagens a miniaturização e a maior BW .

Na próxima subseção, com vistas a gerar um filtro matrioska com alimentações assimétricas e com atenuação livre maior, será utilizado mais um anel matrioska em cascata, gerando um filtro com dois anéis matrioska em cascata e com dois anéis concêntricos cada. Ainda, efetuou-se sua miniaturização com relação ao filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos e alimentações simétricas do qual é derivado, mantendo-se sua utilização na faixa de frequências de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz para aplicações de Wi-Fi.

5.2.3 Filtros com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada

Inicialmente reproduziu-se o filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada, com alimentações simétricas (filtro 7) e $L_{1e} = 11,6$ mm, $L_{2e} = 7,6$ mm, $dy = 1$ mm e $d = 10$ mm, conforme projetado em [16]. Os dois ressonadores em cascata são idênticos entre si e são iguais ao ressonador do filtro 4. A curva reproduzida nesta dissertação (simulação, Filtro 7) bem como a curva original medida são mostradas na Figura 72.

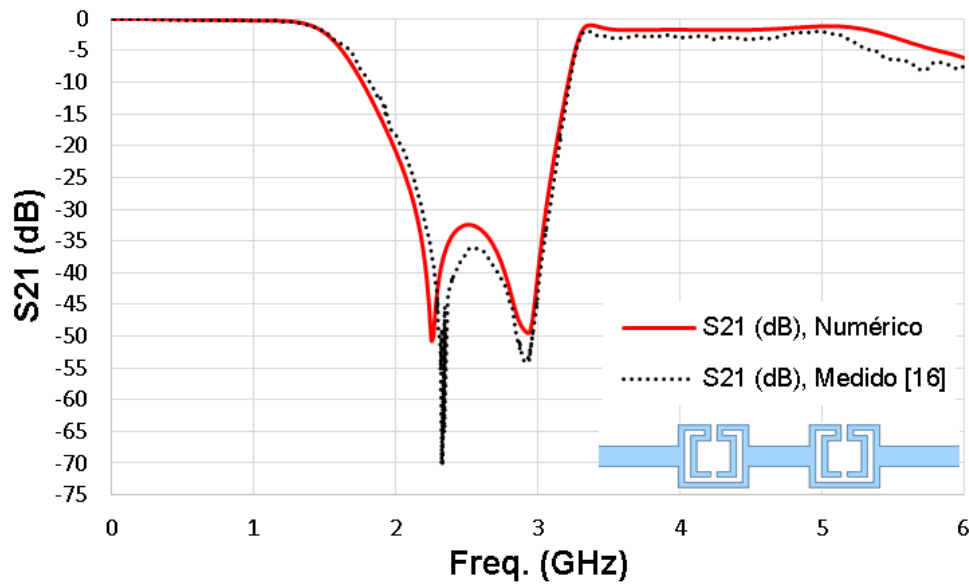


Figura 72 — S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada e alimentações simétricas – Geometria matrioska aberta - Filtro 7.

A $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ simuladas nesta dissertação são de 2,253 GHz e 2,933 GHz, respectivamente, enquanto as medidas em [16] foram de 2,321 GHz e 2,911 GHz, uma diferença de 3,02% e 0,75%, respectivamente.

A Tabela 19 apresenta os dados simulados nesta dissertação e os dados medidos apresentados em [16].

Tabela 19 — Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada – Geometria matrioska aberta - Dados medidos em [16] e simulados nesta dissertação.

	$f_{res(1)}$ (GHz)	$f_{res(2)}$ (GHz)	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	f_{t1} (GHz)	f_{t2} (GHz)	BW (GHz)	AL (dB)	Q	λ_0 (mm)	Área ocupada (mm ²)	Área ocupada - λ_0^2 (mm ²)
Filtro 7 medido em [16]	2,321	2,911	1,551	3,281	0,630	0,160	1,730	36,000	1,304	132,988	385,12	$0,0218\lambda_0^2$
Filtro 7 - simulado	2,253	2,933	1,544	3,291	0,595	0,232	1,747	32,442	1,290	133,086	385,12	$0,0217\lambda_0^2$

Comparando o filtro 7 simulado com o anel em C simétrico (filtro 1 simulado), observa-se uma menor f_{t1} e f_{t2} e um maior Q , indicando maior seletividade. Em relação ao filtro 4 simulado, o filtro 7 destaca-se por sua maior atenuação livre e BW.

Após análise, variando L_{1e} , L_{2e} , y_1 , y_2 , d e a , foi escolhida uma configuração de filtro com alimentações assimétricas, Figura 73, devido a sua maior atenuação livre em comparação com outras configurações assimétricas simuladas e miniaturização com relação ao filtro 7, mantendo a utilização na faixa de frequências de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz para aplicações de *Wi-Fi*, de forma a possibilitar uma comparação mais direta com o filtro 7.

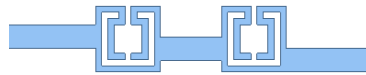


Figura 73 — Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada – Geometria matrioska aberta – Filtro 8.

A resposta em frequência simulada e medida desse filtro, denominado filtro 8, com as dimensões $L_{1e} = 10,6$ mm, $L_{2e} = 6,6$ mm, $dy = 1$ mm, $y_1 = 3$ mm, $y_2 = 6,8$ mm, $d = 10$ mm e $a = 5$ mm, é apresentada na Figura 74.

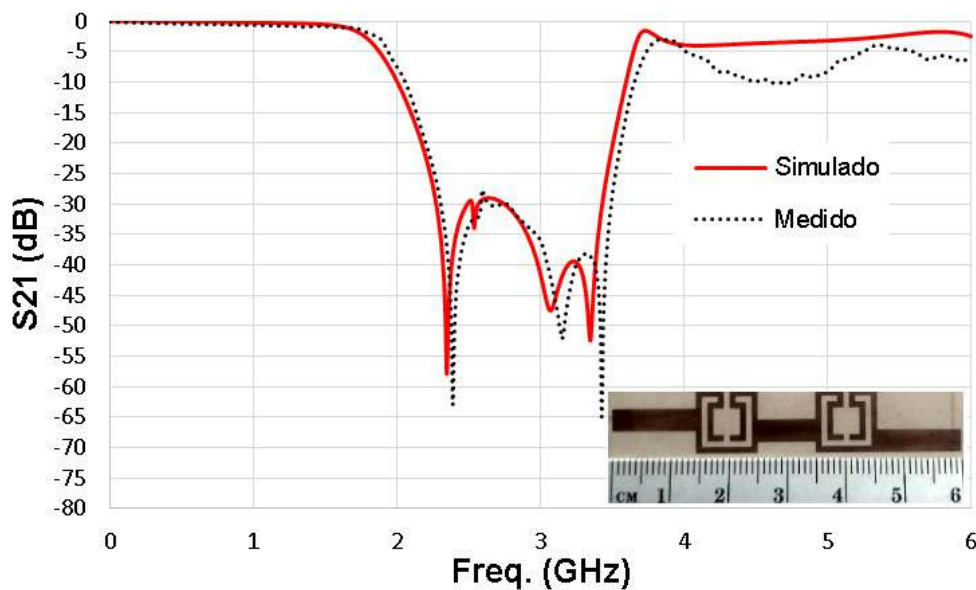


Figura 74 — S_{21} (dB) x Freq. (GHz) – Filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada e alimentações assimétricas – Geometria matrioska aberta - Filtro 8.

Nota-se que as curvas simulada e medida apresentam concordância.

A Tabela 20 apresenta os dados simulados e medidos do filtro 8.

Tabela 20 — Resultado simulado e medido – Filtro 8.

	$f_{res(1)}$ (GHz)	$f_{res(2)}$ (GHz)	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	f_{t1} (GHz)	f_{t2} (GHz)	BW (GHz)	AL (dB)	Q	λ_0 (mm)	Área ocupada (mm ²)	Área ocupada - λ_0^2 (mm ²)
Filtro 8 - simulado	2,347	3,348	1,801	3,676	0,472	0,245	1,875	29,037	1,372	116,594	330,72	0,0243 λ_0^2
Filtro 8 - medido	2,389	3,426	1,893	3,816	0,413	0,322	1,923	27,640	1,398	111,620	330,72	0,0266 λ_0^2

Comparado com os filtros com um anel do tipo C com alimentações assimétricas, filtros 2 e 3 medidos, a vantagem do filtro 8 medido é a seletividade. Com relação aos filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos assimétricos, filtros 5 e 6 medidos, as vantagens do filtro 8 medido são a maior atenuação livre e a seletividade.

A Figura 75 apresenta as respostas medidas dos filtros 7 e 8 consolidadas.

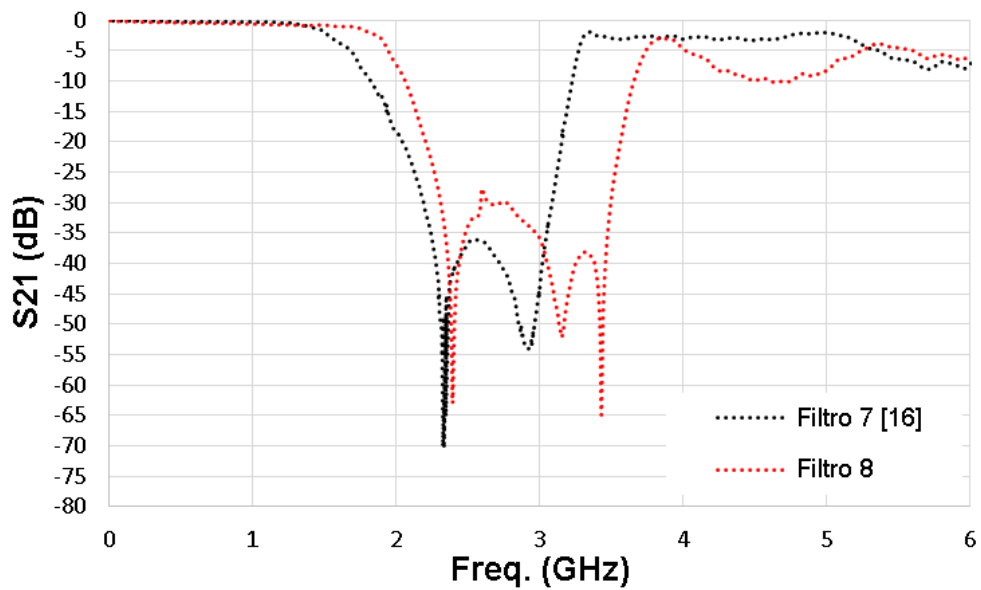


Figura 75 — S21 (dB) x Freq. (GHz) - Filtro com dois anéis matrioska em cascada, com dois anéis concêntricos cada – Geometria matrioska aberta - Respostas consolidadas.

A Tabela 21 apresenta um resumo dos resultados medidos dos filtros 7 e 8.

Tabela 21 — Filtros com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada – Geometria matrioska aberta - Resultados das medições.

	$f_{res(1)}$ (GHz)	$f_{res(2)}$ (GHz)	f_{c1} (GHz)	f_{c2} (GHz)	f_{t1} (GHz)	f_{t2} (GHz)	BW (GHz)	AL (dB)	Q	λ_0 (mm)	Área ocupada (mm ²)	Área ocupada - λ_0^2 (mm ²)
Filtro 7 medido em [16]	2,321	2,911	1,551	3,281	0,630	0,160	1,730	36,000	1,304	132,988	385,12	$0,0218\lambda_0^2$
Filtro 8 - medido	2,389	3,426	1,893	3,816	0,413	0,322	1,923	27,640	1,398	111,620	330,72	$0,0266\lambda_0^2$

Comparando os dados medidos dos filtros 7 e 8, o primeiro sendo o filtro com alimentações simétricas medido e o segundo sendo o filtro com alimentações assimétricas derivado do primeiro com miniaturização, ambos fabricados com a intenção de utilização na faixa de frequências de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz para aplicações de *Wi-Fi*, mesmo tendo áreas ocupadas diferentes, a $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ do filtro 8 são, respectivamente, 2,93% e 17,69% maiores. Já com relação a faixa de transição, a f_{t1} e a f_{t2} do filtro 8 são, respectivamente, 34,44% menor e 101,25% maior. A BW do filtro 8, por sua vez, é 11,16% maior e o Q do filtro 8 é 7,21% maior, ocorrendo ainda menos atenuação livre no filtro 8 na banda de rejeição. A área ocupada do filtro 8 é 14,13% menor.

Pelos dados acima, os grandes atrativos do filtro 8 com alimentações assimétricas com relação ao filtro 7 medido é a seletividade, uma BW maior, e a miniaturização, sendo o filtro com geometria matrioska aberta e alimentações assimétricas fabricado nesta dissertação que mais colecionou vantagens com relação ao filtro com alimentações simétricas no qual é baseado.

No capítulo que segue, serão apresentadas as conclusões da dissertação e recomendações para trabalhos posteriores.

6 CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação foram investigados filtros com alimentações assimétricas e geometria matrioska. Inicialmente, foi realizada uma revisão da bibliografia sobre os filtros, e logo após uma revisão da bibliografia específica sobre filtros matrioska, incluindo testes das equações propostas. Ainda, discorreu-se sobre filtros com um anel do tipo C e filtros com a geometria matrioska aberta, ambos com alimentações assimétricas.

Assim, foram fabricados cinco filtros com as alimentações assimétricas, dois com um anel do tipo C e três com geometria matrioska aberta.

As vantagens dos filtros matrioska com geometria aberta e alimentações assimétricas fabricados nesta dissertação com relação aos filtros matrioska com alimentações simétricas fabricados em [16], considerados em seu conjunto, são a miniaturização e a BW maior, enquanto a desvantagem é a atenuação livre menor.

Constata-se pelas curvas apresentadas no capítulo 4 para os filtros com geometria matrioska aberta e alimentações assimétricas de que trata, que o projetista pode controlar as suas $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ de forma individual, por meio da variação das alimentações desses filtros, com exceção da parametrização 1 do filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos, onde só é possível ajustar a $f_{res(1)}$ em conjunto com a $f_{res(3)}$ quando se varia a alimentação referente a P1.

Outro efeito interessante observado no capítulo 4 na parametrização 2 do filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e alimentações assimétricas e na parametrização 1 do filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada e alimentações assimétricas é que, na variação da posição da alimentação referente a P1 ou P2, de forma isolada, observa-se uma variação na atenuação livre.

Esses efeitos em parâmetros do projeto decorrentes das variações das alimentações em filtros com geometria matrioska aberta e alimentações assimétricas de que trata esta dissertação são constatações inéditas decorrentes deste trabalho, mostrando a flexibilidade dos filtros com alimentações assimétricas aqui estudados

com relação aos com alimentações simétricas, pois possibilitam mais essa forma de controle de parâmetros do projeto.

Diante de mais alternativas de controle de parâmetros de projeto oferecidas pelos filtros com geometria matrioska aberta e alimentações assimétricas aqui estudados com relação aos que utilizam a geometria matrioska aberta e alimentações simétricas, recomenda-se a sua utilização.

Ainda para a parametrização 2 do filtro com um anel matrioska com dois anéis concêntricos e alimentações assimétricas ficou demonstrado no mesmo capítulo que o projetista pode controlar também conjuntamente as $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ por meio da variação das dimensões dos ressonadores. Neste caso, conjuntamente com o efeito nas frequências de ressonância já reportados, verifica-se também variação na atenuação livre e na BW .

Para o caso específico do filtro com dois anéis matrioska em cascata, com dois anéis concêntricos cada e com alimentações assimétricas, pode-se controlar a atenuação livre também por meio da variação dos parâmetros d e a . Devido a esta característica, de forma a melhorar a atenuação livre dos filtros com um anel matrioska com dois anéis concêntricos, uma alternativa interessante seria utilizar mais uma unidade em cascata, ajustando as $f_{res(1)}$ e $f_{res(2)}$ como aqui proposto, e abrindo esta opção de controlar a atenuação livre do filtro.

Assim, em seu conjunto, essas são as formas identificadas com as quais o projetista pode obter a resposta desejada nos projetos de filtros com alimentações assimétricas com geometria matrioska aberta de que trata esta dissertação.

Destaque-se a fabricação do filtro 8 com alimentações assimétricas, que é baseado no filtro 7 com alimentações simétricas, mas que coleciona vantagens com relação a este último, que seriam a seletividade, uma BW maior, e a miniaturização, sendo um exemplo das melhoras que podem ser obtidas quando se utiliza a configuração de alimentações assimétricas no lugar da configuração com alimentações simétricas.

Na próxima subseção, serão indicadas recomendações para trabalhos futuros em continuidade ao que foi desenvolvido nesta dissertação.

6.2 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS POSTERIORES

Como continuidade dos trabalhos aqui desenvolvidos, recomenda-se os seguintes estudos posteriores:

- Estudo de outras configurações de alimentações assimétricas;
- Estudo de configurações de alimentações assimétricas para filtros com um anel matrioska com três anéis concêntricos;
- Variação das dimensões do anel mais interno dos ressonadores matrioska em filtros com alimentações assimétricas;
- Filtros com mais de duas células e alimentação assimétrica.

REFERÊNCIAS


- [1] L. E. Frenzel Jr., *Contemporary Electronics: Fundamentals, Devices, Circuits, and Systems*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.
- [2] Bnsonger47, "Hi-Def Television." Licensed under [CC0](#). Openclipart. Accessed Dec. 11, 2023. [Online.] Available: <https://openclipart.org/detail/163141/hidef-television>
- [3] J4p4n, "Basic Smartphone." Licensed under [CC0](#). Openclipart. Accessed Dec. 11, 2023. [Online.] Available: <https://openclipart.org/detail/324566/basic-smartphone>
- [4] Simon Haykin, *Communication systems*, 4th ed., New York, NY, USA: Wiley, 2001.
- [5] J.-S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF / Microwave Applications*. New York, NY, USA: Wiley, 2001.
- [6] H. P. A. Ferreira, "Matrioska: Uma proposta de geometria para FSS multibandas", Dissertação de mestrado, Inst. Fed. Educ. Ciência Tecnol. Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2014. [Online]. Disponível: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/274>
- [7] A. Gomes Neto, A. G. DAssunção, J. C. e Silva, A. N. da Silva, H. de P. A. Ferreira and I. S. S. Lima, "A proposed geometry for multi-resonant frequency selective surfaces," in *2014 44th Eur. Microwave Conf.*, Rome, Italy, 2014, pp. 897-900, doi: 10.1109/EuMC.2014.6986580.
- [8] J. N. Cruz, "Caracterização de FSS com geometria matrioska aberta", Dissertação de mestrado, Inst. Fed. Educ. Ciência Tecnol. Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2015. [Online]. Disponível: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/240>
- [9] A. G. Neto, A. G. DAssunção Junior, J. Costa e Silva, J. Do Nascimento Cruz, J. B. de Oliveira Silva and N. J. Pereira de Lyra Ramos, "Multiband frequency selective surface with open matryoshka elements," in *2015 9th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Lisbon, Portugal, 2015, pp. 1-5.
- [10] Alfredo Gomes Neto, J. Costa, J. Nogueira, and Custódio Peixeiro, "Planar Printed Structures Based on Matryoshka Geometries: A Review," *Micromachines*, vol. 15, no. 4, pp. 469–469, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/mi15040469>.

- [11] J. A. da S. Neto, "Utilização de ressonadores metamateriais na melhoria de desempenho de filtros planares", Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2019. [Online]. Disponível: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/30834>
- [12] Vaishnavi Bhope and A. R. Harish, "Polarization Insensitive Miniaturized Multiband FSS using Matryoshka Elements," *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, Jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/ap-s/usnc-ursi47032.2022.9887292>.
- [13] A. G. Neto, J. N. de Carvalho, J. G. de O. Mariano, T. R. de Sousa, "Análise da aplicação da geometria matrioska aos filtros em microfita," in *MOMAG2016*, Porto Alegre, Brasil, Jul. 25–29, 2016, pp. 1-5.
- [14] J. G. de O. Mariano, "Implementação de filtros planares baseados na geometria matrioska", Dissertação de mestrado, Inst. Fed. Educ. Ciência Tecnol. Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2017. [Online]. Disponível: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/298>
- [15] A. G. Neto, A. F. Neto, M. C. De Andrade, J. C. E Silva, J. N. de Carvalho, "Filtros em microfita utilizando a geometria anéis matrioska circulares," in *MOMAG2018*, Santa Rita do Sapucaí, Brasil, Ago. 12–15, 2018, pp. 366-370. [Online]. Disponível: https://www.sbmo.org.br/anais_momag/anais_momag_2018.pdf
- [16] A. F. Neto, "Filtros planares baseados na geometria matrioska com anéis retangulares e circulares", Dissertação de mestrado, Inst. Fed. Educ. Ciência Tecnol. Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2020. [Online]. Disponível: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/999>
- [17] C.-Y. Chen, C.-Y. Hsu, and H.-R. Chuang, "Design of Miniature Planar Dual-Band Filter Using Dual-Feeding Structures and Embedded Resonators," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 16, no. 12, pp. 669–671, Dec. 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/lmwc.2006.885621>.
- [18] A. Slimani, S. Das, W. A. E. Ali, A. El Alami, S. D. Bennani, and M. Jorio, "Second order microstrip bandpass filter design based on square resonator for 5G sub-6 GHz band," *J. Instrum.*, vol. 17, no. 07, July 2022, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/07/p07002>.

- [19] K.-D. Xu, Y.-H. Zhang, Y. Fan, J. L.-W. Li, W. T. Joines, and Q. H. Liu, "Planar dual- and tri-band bandpass filters using single improved ring resonator and simple feed scheme," *Microw. Opt. Technology Lett.*, vol. 56, no. 3, pp. 574–577, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/mop.28159>
- [20] B. Damon, "POTD 2014-01-20 - Russian nesting dolls." Licensed under [CC-BY-2.0](https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/). *Flickr*. Accessed May 11, 2023. [Online.] Available: <https://www.flickr.com/photos/57325827@N00/12060301314>
- [21] R. E. Collin, *Foundations for microwave engineering*, 2nd ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2001.
- [22] A. S. Sedra and Kenneth Carless Smith, *Microelectronic circuits* (The Oxford series in electrical and computer engineering), A. S. Sedra, Ed., 7th ed., New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 2015.
- [23] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- [24] W. Oskay, "Two inductors." Licensed under [CC-BY-2.0](https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/). *Flickr*. Accessed DEC. 18, 2023. [Online.] Available: <https://www.flickr.com/photos/17425845@N00/437342545>
- [25] J. A. J. Ribeiro, *Engenharia de microondas: fundamentos e aplicações*. São Paulo, Brasil: Érica, 2008.
- [26] A. Reinhold, "File:Hilofilteer.agr.jpg." Licensed under [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/). Wikimedia Commons. Accessed DEC. 19, 2023. [Online.] Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=441532>
- [27] A. Chen and T. Yang, "A microstrip bandpass filter with tunable bandwidth and center frequency," *Microw. Opt. Technology Lett.*, vol. 63, no. 9, pp. 2333-2336, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/mop.32909>.
- [28] L. Chen, J. Y. Peng, M. Wang, T. T. Zhang, and F. Wei, "Compact balanced tri-band bandpass filter based on stub loaded resonator with high selectivity," *Int. J. of RF Microw. Comput. Aided Eng.*, vol. 31, no. 12, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/mmce.22911>.
- [29] A. Iqbal, A. Smida, M. I. Waly, and N. K. Mallat, "Highly-tunable and wide stopband microstrip bandpass filters," *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, vol. 31, no. 5, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/mmce.22610>.
- [30] C. S. Kavitha Devi, H. Umadevi, and J. S. Baligar, "Reconfigured compact Minkowski fractal microstrip filter," *Microw. Opt. Technology Lett.*, vol. 64, no. 3, pp. 471–475, Dec. 2022, doi: [10.1002/mop.33134](https://doi.org/10.1002/mop.33134).

- [31] K. V. Phani Kumar, V. K. Velidi, A. A. Althuwayb, and T. Rama Rao, "Microstrip Dual-Band Bandpass Filter With Wide Bandwidth Using Paper Substrate," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 31, no. 7, pp. 833-836, Jul. 2021, doi: 10.1109/LMWC.2021.3077879.
- [32] C. Wu and W. Tu, "Design of microstrip quint-band lowpass–bandpass filters with flexible passband allocation," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 16, no. 6, pp. 378–390, May 2022, doi: <https://doi.org/10.1049/mia2.12253>.
- [33] X. Zeng, J. Gong, X. Li, and F. Liang, "Improved SCRLH ZOR-based compact microstrip bandpass filter with wide upper stopband," *Microw. Opt. Technology Lett.*, vol. 65, no. 1, pp. 14–19, Jan. 2023, doi: 10.1002/mop.33440.
- [34] F. Zhang, Y. Gao, Y. Wang, Y. Zhang, Y. Dong, and J. Xu, "Highly compact quad-band bandpass filter with flexibly controllable passbands," *Electronics Lett.*, vol. 57, no. 7, pp. 276–278, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1049/ell2.12023>.
- [35] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, 5th ed., Porto Alegre, Brasil: Bookman (in Portuguese), 2012.
- [36] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, *Fundamentals of electric circuits*, 5th ed., New York, NY, USA: Mcgraw-Hill, 2013.
- [37] T. Wang and J. Roychowdhury, "Rigorous Q Factor Formulation and Characterization for Nonlinear Oscillators," *arXiv (Cornell University)*, Oct. 2017, doi: <https://doi.org/10.48550/arxiv.1710.02015>.
- [38] A. Boutejdar, A. Batmanov, A. Omar and E. Burte, "A new method to improve the rejectband of a 5.6 GHz bandstop filter using $\lambda/2$ open-loop ring microstrip resonators," in *2008 Asia-Pac. Microwave Conf.*, Hong Kong, China, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/APMC.2008.4958257.
- [39] B Jitha, "Development of compact microwave filters using microstrip loop resonators", Ph.D. dissertation, Dept. Elect., Cochin Univ. Sci. Technol., Kochi, India, 2010. [Online]. Available: <https://dyuthi.cusat.ac.in/xmlui/handle/purl/2672>
- [40] S. Ramya and I. S. Rao, "Design of compact ultra-wideband microstrip bandstop filter using split ring resonator," in *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, Melmaruvathur, India, 2015, pp. 0105-0108, doi: 10.1109/ICCSP.2015.7322658.
- [41] E. Hammerstad and O. Jensen, "Accurate Models for Microstrip Computer-Aided Design", in *1980 IEEE MTT-S Int. Microwave symp. Dig.*, Washington, DC, USA, 1980, pp. 407-409, doi: 10.1109/MWSYM.1980.1124303.

[42] Ansys. "Ansys HFSS: best-in-class 3d high frequency structure simulation software." ANSYS.com. Accessed: May 12, 2023. [Online.] Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>

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

Documento Digitalizado Restrito

Dissertação

Assunto:	Dissertação
Assinado por:	Marcus Lopes
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Restrito
Hipótese Legal:	Direito Autoral (Art. 24, III, da Lei no 9.610/1998)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcus Estevão Sousa Lopes, DISCENTE (20221630004) DE Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica - João Pessoa**, em 28/08/2024 15:51:01.

Este documento foi armazenado no SUAP em 28/08/2024. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1232732

Código de Autenticação: 969667d0da

