



Josefa Gilliane de Oliveira Mariano

**IMPLEMENTAÇÃO DE FILTROS PLANARES BASEADOS
NA GEOMETRIA MARIOSKA**

JOÃO PESSOA, PB
Março, 2017

Josefa Gilliane de Oliveira Mariano

**IMPLEMENTAÇÃO DE 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 Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações
Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Alfredo Gomes Neto, Dr. – IFPB.
Orientador

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

M333i Mariano, Josefa Gilliane de Oliveira.

Implementação de filtros planares baseados na geometria Matrioska / Josefa Gilliane de Oliveira Mariano. – 2017.
75 f. : il.

Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.

Orientação : Prof. D.r Alfredo Gomes Neto.

1. Engenharia de micro-ondas. 2. Telecomunicações - filtro de micro-ondas. 3. Geometria matrioska. 4. Eletromagnetismo. 5. Ressonadores. I. Título.

CDU 537-962(043)

Josefa Gilliane de Oliveira Mariano

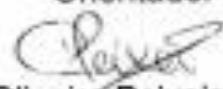
**IMPLEMENTAÇÃO DE FILTROS PLANARES BASEADOS
NA GEOMETRIA MATRIOSKA**

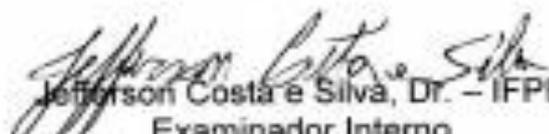
Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre Engenharia Elétrica.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 15 / 03 / 2017

BANCA EXAMINADORA


Alfredo Gomes Neto, Dr – IFPB,
Orientador


Custódio José de Oliveira Peixeiro, PhD – IST/Portugal
Examinador Externo


Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Examinador Interno


Lincoln Machado de Araújo, Dr. – IFPB
Examinador Interno

Dedico esta dissertação aos meus avós maternos, “*In Memoriam*”.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado força e coragem, por não ter me deixado desistir, por está sempre me abençoando.

Ao meu filho Luiz Gustavo, por ficado muita vezes sem minha presença durante esse período que passei fazendo o mestrado.

A minha família, em especial a minha mãe Maria Ozélia por ter ficado cuidando do meu filho, enquanto eu fazia o mestrado, ao meu pai Geraldo, aos meus irmãos, as minhas cunhadas e restante da família.

Agradeço ao professor Alfrêdo Gomes Neto, por toda orientação e ensinamentos, pela confiança, pelos conhecimentos compartilhados, pela dedicação, pelos conselhos, pelos incentivos, por tudo.

Ao IFPB – Campus João Pessoa, pela oportunidade de crescimento profissional, por sempre manter as portas abertas e incentivar a pesquisa e o desenvolvimento.

À CAPES, da qual fui bolsista, pelo apoio financeiro.

Ao IFPB – Campus Cajazeiras por ter contribuído na minha formação como Tecnóloga em Automação Industrial, em especial ao Professor Kleber pelo seu incentivo de sempre.

Aos amigos e colegas do mestrado que acompanharam o andamento da pesquisa, que me ajudaram nesta difícil etapa de minha vida.

Ao programa de pós-graduação, PPGEE, e todos os professores que contribuíram de forma direta e indireta pra a conclusão do mestrado.

Aos professores da banca examinadora,

A todos, obrigada!

“Entre o desejo e o alcance, apenas dois moradores, o esforço e a determinação.”

Autor desconhecido

RESUMO

Os filtros desempenham um papel fundamental nos sistemas de telecomunicações. Embora seja uma das tecnologias mais consolidadas na Engenharia de micro-ondas, o intenso crescimento das aplicações dos sistemas de telecomunicações impõe um desafio constante, requerendo o estudo de novas configurações de filtros e uma melhor compreensão do funcionamento dessas estruturas, em face aos requisitos de miniaturização, baixo custo, largura de banda e seletividade em frequência. Neste contexto, propõe-se neste trabalho a implementação de filtros planares utilizando a geometria matrioska com uma e duas seções. Como exemplos de filtros de uma seção são apresentados os resultados numéricos e experimentais de filtros utilizando a geometria matrioska, com um, dois e três anéis matrioska, observando-se uma boa concordância entre esses resultados. São apresentados os resultados numéricos e experimentais de filtros com duas seções, tanto com as mesmas dimensões, como com seções de dimensões diferentes. Além disto, são propostas equações iniciais para as duas primeiras frequências de ressonância, que podem auxiliar no processo de otimização do filtro, fornecendo os valores iniciais de projeto. Dentre as características obtidas, destacam-se: dimensões reduzidas, rápida transição da banda passante para a banda de rejeição e ajuste da largura de banda, o que incentiva a continuidade das pesquisas do filtro proposto.

Palavras-chave: matrioska, filtros em microfita, ressonadores.

ABSTRACT

The filters play a fundamental role in telecommunication systems. Although it is one of the most consolidated technologies in microwave engineering, the intense growth of the applications of telecommunication systems imposes a constant challenge to microwave and antennas engineering, requiring the study of new filter configurations and a better understanding of the characteristics of these structures, trying to attend the requirements such as miniaturization, low cost and specific frequency response requirements such bandwidth and frequency selectivity. In this context, it is proposed in this work the implementation of planar filters using the matrioska geometry with one and two sections. As examples of filters of one section, numerical and experimental results of filters using matrioska geometry with one, two and three matrioska rings, are presented observing a good agreement between these results. Numerical and experimental results of two section filters, with section of the same dimensions, as well with sections of different dimensions are presented. Besides, initial equations are proposed for the first two resonant frequencies that can help in the filter optimization process, providing the initial design values. Among the characteristics obtained, the following stand out: reduced dimensions, fast transition from the pass band to the rejection band and adjustment of the rejection bandwidth.

Key words: matrioska, microstrip filters, resonators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Exemplos de aplicações que utilizam redes de comunicação sem fio [7].	16
Figura 1-2 – Geometrias de filtros reconfigurável [15].	17
Figura 1-3 – Bonecas russas matrioskas [21].	17
Figura 1-4 – (a) Filtro matrioska com 4 anéis e (b) anéis expandidos [17].	18
Figura 2-1 – Exemplos de ressonadores [11].	20
Figura 2-2 – Exemplos de geometria de ressonadores.	20
Figura 2-3 – Simbologia de um filtro.	21
Figura 2-4 – Filtro passivo [31].	21
Figura 2-5 – Filtro ativo [33].	22
Figura 2-6 – Resposta em frequência dos filtros reais [31].	22
Figura 2-7 – Tipos de bandas na resposta em frequência dos filtros [31].	23
Figura 2-8 – Exemplos de componentes concentrados – Resistor e capacitor.	24
Figura 2-9 – Filtro passa-baixas utilizando componentes distribuídos [11].	24
Figura 2-10 – Geometria da microfita [11].	25
Figura 2-11 – Exemplos de equivalências em microfita [11].	26
Figura 2-12 – Diferentes configurações de ressonadores [11].	27
Figura 2-13 – Ressonador em forma de C e circuito equivalente.	28
Figura 2-14 – Geometria matrioska para 2 anéis.	29
Figura 2-15 – Geometria matrioska para 3 anéis.	29
Figura 3-1 – Exemplo de filtro fabricado.	30
Figura 3-2 – Configuração dos equipamentos utilizados na caracterização experimental.	31
Figura 3-3 – Ressonadores com um anel, de 30 mm, 22 mm e 18 mm.	31
Figura 3-4 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonadores com um anel, de 30 mm, 22 mm e 18 mm.	32
Figura 3-5 – Comparação entre os valores calculados para a frequência de ressonância – Equação (1) ANSYS Designer 8.0.	33
Figura 3-6 – Ressonadores com dois anéis.	33
Figura 3-7 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonadores com dois anéis, L2ext de 20 mm, 12 mm e 8 mm.	34

Figura 3-8 – Comparação entre os valores calculados para as frequências de ressonância – $L_{1ext}=28$ mm, equações (7) e (8), ANSYS designer 8.0.....	35
Figura 3-9 – Ressonadores com três anéis.	36
Figura 3-10 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonadores com três anéis.....	36
Figura 3-11 – Comparação entre os valores calculados para as frequências de ressonância – $L_{1ext}=36$ mm e $L_{1ext}=28$ mm, equações (9) e (10), ANSYS designer 8.0.	38
Figura 4-1 – Exemplo de estruturas em cascata de mesma geometria.	39
Figura 4-2 – Exemplo de estruturas em cascata com geometrias diferentes.	39
Figura 4-3 – Exemplos de filtros com estruturas em cascata de mesma geometria variando a distância.	40
Figura 4-4 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonadores com um anel em cascata, L_{ext} de 22 mm, variando a distância de 3 mm até 30mm.	41
Figura 4-5 – Ressonador com um anel L_{ext} 28mm.	41
Figura 4-6 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador com um anel L_{ext} 28mm. ..	42
Figura 4-7 – Ressonador em cascata com um anel, L_{ext} de 28 mm e distância de 3 mm.	43
Figura 4-8– $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com um anel, L_{ext} de 28 mm e distância de 3 mm.	43
Figura 4-9 – Ressonador em cascata com um anel, L_{ext} de 28 mm e distância de 14 mm.	44
Figura 4-10 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com um anel, L_{ext} de 28 mm e distância de 14 mm.	44
Figura 4-11 – Ressonador em cascata com um anel, L_{ext} de 28 mm e distância de 28 mm.	45
Figura 4-12 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com um anel, L_{ext} de 28 mm e distância de 28 mm.	45
Figura 4-13 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonadores em cascata com dois anéis em cascata, L_{ext} de 28 mm/20mm, variando a distância de 3 mm até 30mm.	46
Figura 4-14 – Ressonador em cascata com dois anéis, L_{ext} de 28 mm/20 mm.....	47
Figura 4-15 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com dois anéis, L_{ext} de 28 mm/20mm.	47

Figura 4-16 – Ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28 mm/20mm e distância de 3 mm.	48
Figura 4-17 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28 mm/20mm e distância de 3 mm.	48
Figura 4-18 – Ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28 mm/20 mm e distância de 14 mm.	49
Figura 4-19 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28 mm/20mm e distância de 14 mm.....	49
Figura 4-20 – Ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28 mm/20 mm e distância de 28 mm.	50
Figura 4-21 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28 mm/20mm e distância de 28 mm.....	51
Figura 4-22 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonadores em cascata com três anéis, Lext de 28 mm/20mm/12mm, variando a distância de 3 mm até 30mm. ..	52
Figura 4-23 – Ressonador em cascata com três anéis Lext 28mm/20mm/12mm. ...	52
Figura 4-24 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28 mm/20mm/12mm.....	53
Figura 4-25 – Ressonador em cascata com três anéis Lext 28mm/20mm/12mm e distância de 3 mm.	54
Figura 4-26 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28 mm/20mm/12mm e distância de 3 mm.....	54
Figura 4-27 – Ressonador em cascata com três anéis Lext 28mm/20mm/12mm e distância de 14 mm.	55
Figura 4-28 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28 mm/20mm/12mm e distância de 14 mm.....	55
Figura 4-29 – Ressonador em cascata com três anéis Lext 28mm/20mm/12mm e distância de 28 mm.	56
Figura 4-30 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28 mm/20mm/12mm e distância de 28 mm.....	56
Figura 4-31 – Ressonador em cascata com três anéis Lext 28mm/19mm/8mm.	57
Figura 4-32 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28 mm/19mm/8mm.....	58
Figura 4-33 – Ressonador em cascata com três anéis L1ext 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 3 mm.....	59

Figura 4-34 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 3 mm.....	59
Figura 4-35 – Ressonador em cascata com três anéis L1ext 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distancia de 14 mm.....	60
Figura 4-36 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28 mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 14 mm. 60	60
Figura 4-37 – Ressonador em cascata com três anéis L1ext 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distancia de 28 mm.....	61
Figura 4-38 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28 mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 28 mm. 61	61
Figura 4-39 – Ressonador em cascata com três anéis L1ext 28mm/17mm/8mm. ...	62
Figura 4-40 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28 mm/17mm/8mm.....	62
Figura 4-41 – Ressonador em cascata com três anéis, L1ext 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distancia de 3 mm.....	63
Figura 4-42 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28 mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 3 mm. ..	63
Figura 4-43 – Ressonador em cascata com três anéis, L1ext 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distancia de 14 mm.....	64
Figura 4-44 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28 mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 14 mm. 65	65
Figura 4-45 – Ressonador em cascata com três anéis, L1ext 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distancia de 28 mm.....	66
Figura 4-46 – $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28 mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 28 mm. 66	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Parâmetros utilizados na simulação.	30
Tabela 3-2 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador com um anel.....	32
Tabela 3-3 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador com dois anéis.	34
Tabela 3-4 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador com três anéis.....	37
Tabela 4-1– Parâmetros utilizados na simulação.	40
Tabela 4-2 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador com um anel, Lext de 28mm.	42
Tabela 4-3 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com um anel Lext de 28mm e distância de 3mm.	43
Tabela 4-4 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com um anel, Lext de 28mm e distância de 14mm.	44
Tabela 4-5 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com um anel, Lext de 28mm e distância de 28mm.....	45
Tabela 4-6 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28mm/20mm.....	47
Tabela 4-7 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28mm/20 mm e distância de 3 mm.	48
Tabela 4-8 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28mm/20 mm e distância de 14 mm.	50
Tabela 4-9 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28mm/20 mm e distância de 28 mm.	51
Tabela 4-10 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28mm/20 mm/12mm.	53
Tabela 4-11 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28mm/20 mm/12mm e distância de 3 mm.	54

Tabela 4-12 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28mm/20 mm/12mm e distância de 14 mm.	55
Tabela 4-13 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28mm/20 mm/12mm e distância de 28 mm.	57
Tabela 4-14 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28mm/19 mm/8mm.	58
Tabela 4-15 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 3 mm.	59
Tabela 4-16 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 14 mm.	60
Tabela 4-17 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 28 mm.	61
Tabela 4-18 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/17mm/8mm.	62
Tabela 4-19 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 3 mm.	64
Tabela 4-20 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 14 mm.	65
Tabela 4-21 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 28 mm.	66

LISTA DE SIGLAS

CAD	<i>Computer aided design</i>
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i> , superfície seletiva em frequência
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

LISTA DE SIMBOLOS

BW	Largura de banda
f_C	Frequência de corte
f_H	Frequência de corte superior
f_L	Frequência de corte inferior
f_{res}	Frequência de ressonância
$fr1$	Primeira frequência de ressonância
$fr2$	Segunda frequência de ressonância
$fr3$	Terceira frequência de ressonância
g	Largura da fenda
h	Altura do substrato
L	Distância entre as portas 1 e 2
L_{ef}	Comprimento médio do anel
$L1\ int$	Comprimento interno do primeiro anel
$L1\ ext$	Comprimento externo do primeiro anel
$L2\ int$	Comprimento interno do segundo anel
$L2\ ext$	Comprimento externo do segundo anel
$L3\ int$	Comprimento interno do terceiro anel
$L3\ ext$	Comprimento externo do terceiro anel
$P1$	Porta 1
$P2$	Porta 2
W	Largura da linha de microfita
W_0	Largura da linha de microfita da alimentação
Z_0	Impedância característica
ϵ_{ref}	Constante dielétrica efetiva
ϵ_r	Constante dielétrica
λ_g	Comprimento de onda guiado
$ S_{21} $	Módulo de coeficiente de transmissão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 Filtros de micro-ondas.....	24
2.2 Geometria matrioska.....	27
3 FILTROS DE UMA SEÇÃO: RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS	30
3.1 Filtros com um anel.....	31
3.2 Filtro com dois anéis.....	33
3.3 Filtro com três anéis.....	35
3.4 Conclusão da análise dos filtros com uma seção.....	38
4 FILTROS COM DUAS SEÇÕES EM CASCATA: RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS.....	39
4.1 Estruturas em cascata de mesma geometria.....	40
4.2 Estruturas em cascata com geometrias diferentes.....	57
5 CONCLUSÃO.....	67
5.1 Considerações finais.....	67
5.2 Sugestões e trabalhos futuros.....	68
TRABALHOS PUBLICADOS E DEPOSITO DE PATENTE.....	69
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a utilização dos sistemas de telecomunicação vem crescendo rapidamente, principalmente devido ao aumento na quantidade de aplicações que utilizam tecnologias de comunicação sem fio, demandando a implementação de dispositivos com dimensões e peso cada vez menores. Com isso, surge a necessidade de atender à crescente e contínua demanda da sociedade por bens e serviços que utilizam dispositivos que operem em diferentes faixas de frequência sem que haja interferência ou impedimento entre os serviços oferecidos, proporcionando o desenvolvimento de novas aplicações, predominantemente fazendo uso de redes de comunicação sem fio, Figura 1-1[1]–[7].



Figura 1-1 — Exemplos de aplicações que utilizam redes de comunicação sem fio [7].

Com a crescente demanda de aplicações das comunicações sem fio em altas frequências, os engenheiros de telecomunicações são continuamente desafiados a desenvolver filtros que atendam a requisitos específicos de resposta em frequência. Neste caso, a utilização da tecnologia planar em microfita tem sido uma opção bastante utilizada [8]–[11]. Dentre as características de projeto, a geometria do filtro desempenha um papel de fundamental importância, sendo objeto de constantes pesquisas.

Recentemente, o desenvolvimento de novas configurações de filtros tem atraído o interesse de diversos pesquisadores, especialmente na realização de filtros reconfiguráveis, Figura 1-2. Na obtenção de filtros planares em micro-ondas um dos parâmetros de maior flexibilidade é a sua geometria, possibilitando o ajuste de suas principais características, tais como frequências de corte e faixas de

transmissão/rejeição, [4], [8]–[15]. Os conceitos de filtros e suas aplicações são detalhados no Capítulo 2 desta dissertação.

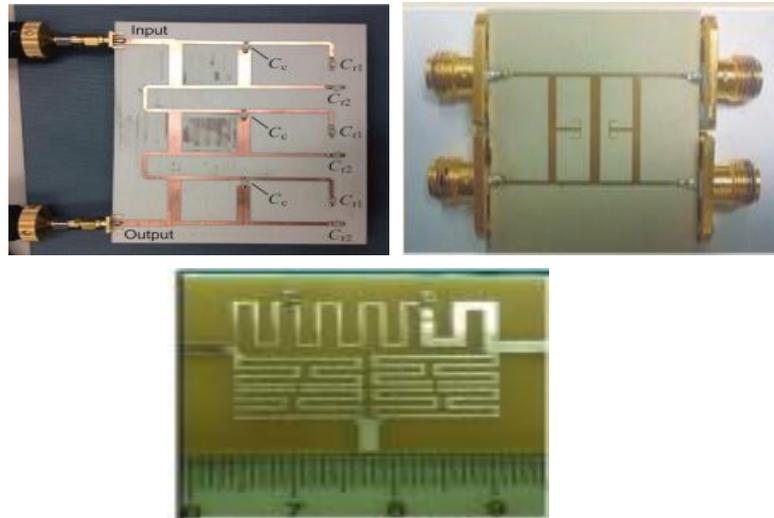


Figura 1-2 – Geometrias de filtros reconfigurável [15].

A partir dos estudos realizados no grupo de Telecomunicação e Eletromagnetismo Aplicado, GTEMA/IFPB, que utilizam uma geometria baseada nas bonecas russas, matrioskas, e aproveitando as características previamente identificadas e aplicadas com sucesso nas superfícies seletiva em frequência, FSS, [16]–[19], foram iniciados estudos sobre a implementação de filtros em microfita utilizando essa geometria [20].

As bonecas russas matrioskas, Figura 1-3, são constituídas por uma série de bonecas colocadas umas dentro das outras, expandindo-se da maior (mais externa) até a menor (mais interna) em várias bonecas, ocupando apenas o volume delimitado pela boneca mais externa [17], [21].



Figura 1-3 – Bonecas russas matrioskas [21].

Nas aplicações em FSS, os anéis internos da geometria matrioska permanecem interligados, formando um único anel, Figura 1-4, obtendo-se, dessa forma, um maior comprimento efetivo e, por conseguinte, interessantes características de miniaturização [17].

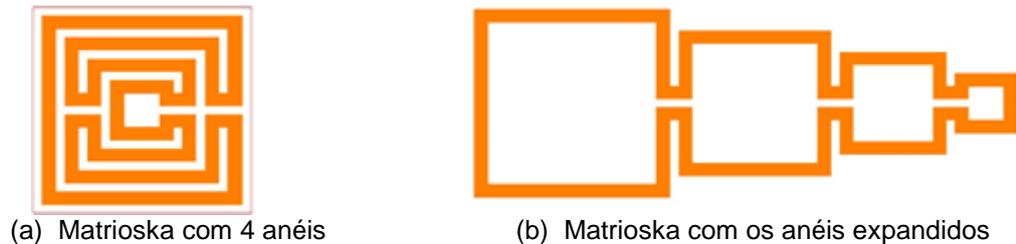


Figura 1-4 – (a) Filtro matrioska com 4 anéis e (b) anéis expandidos [17].

Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo desenvolver filtros com base na geometria matrioska. São apresentados resultados numéricos e experimentais, observando-se uma excelente concordância entre os mesmos, destacando-se a rápida transição da banda passante para a banda de rejeição, as dimensões reduzidas e o ajuste da largura da banda de rejeição [20]. São propostas equações iniciais para as duas primeiras frequências de ressonância, que podem auxiliar no processo de otimização do filtro, fornecendo os valores iniciais de projeto. Os resultados numéricos foram obtidos pelo programa computacional ANSYS designer 8.0.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos fundamentais sobre os filtros elétricos e de micro-ondas, descrevendo suas características, aplicações e classificações. São apresentados alguns tipos de ressonadores. Além disso, são descritas as geometrias matrioska, com um, dois e três anéis.

No capítulo 3 são apresentados os resultados numéricos e experimentais dos filtros com uma seção, com geometria de um, dois e três anéis.

No capítulo 4 são apresentados os resultados numéricos e experimentais dos filtros com duas seções em cascata. Foram analisadas as estruturas com geometrias iguais e diferentes para filtros com um, dois e três anéis matrioska.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões da dissertação, assim como sugestões para sua continuidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os filtros desempenham um papel fundamental nos sistemas de telecomunicações. Basicamente, separam e delimitam sinais de RF/micro-ondas dentro de determinadas faixas do espectro de frequência [4], [11]. As suas aplicações abrangem as mais diversas áreas, usadas nas comunicações móveis, sistemas de comunicação por satélites, radar, sistemas de ráiodifusão, entre outras. Recentemente, com o intenso crescimento das aplicações dos sistemas de telecomunicações, tanto em número de usuários, como em diversidade de serviços, novos requisitos de resposta em frequência (perda de inserção, perda de retorno, largura de banda, seletividade, linearidade de fase, entre outros.), miniaturização, peso e custos reduzidos, impõem um desafio constante para os engenheiros de micro-ondas, requerendo o estudo de novas configurações e uma melhor compreensão do funcionamento dessas estruturas [22], [23].

Em aplicações na faixa de frequência de micro-ondas, manter reduzidas as dimensões e o mínimo peso dos filtros são requisitos importantes e, assim sendo, sempre que possível, a tecnologia planar é adotada. Neste caso, a geometria do filtro planar é um dos fatores de maior flexibilidade para obtenção de determinadas respostas em frequência. Com a disponibilidade de recursos computacionais, uma maior variedade de geometrias passou a ser considerada no projeto de filtros e, entre essas geometrias, os ressonadores recebem uma especial atenção, Figura 2-1 [11], [23], [24]. Os filtros baseados em ressonadores que utilizam linhas de microfita e similares (linhas coplanares, linhas acopladas, entre outras.) são amplamente empregados nos sistemas de comunicações sem fio. Embora esses filtros apresentem desvantagens tais como perdas de inserção elevadas e um fator de qualidade menor quando comparados, por exemplo, aos filtros em guia de ondas ou ressonadores dielétricos, eles são adotados pela facilidade de fabricação, diversidade de aplicações e possibilidade de integração diretamente com circuitos ativos [11].

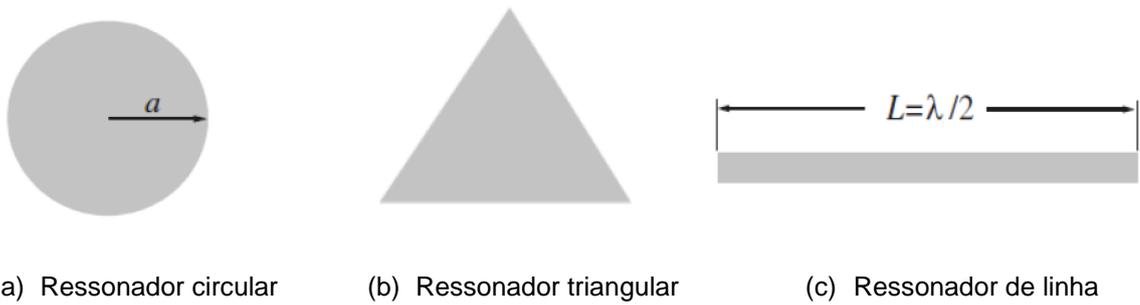
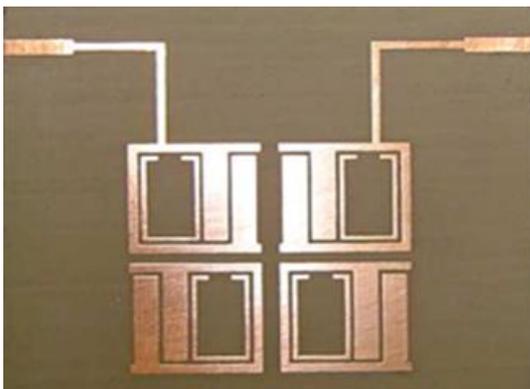
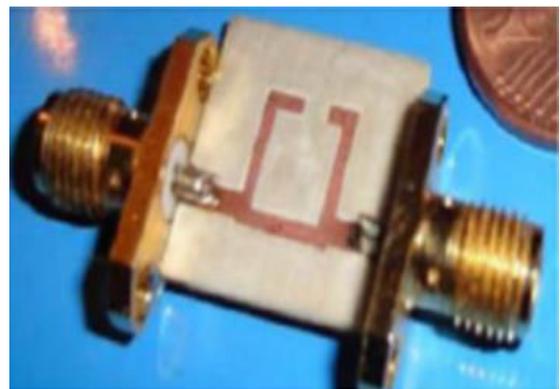


Figura 2-1 – Exemplos de ressonadores [11].

Existem diversas geometrias de ressonadores em microfita e a escolha de uma determinada geometria depende do tipo de filtro, da técnica de fabricação, das perdas admitidas, do fator de qualidade desejado, etc. Na Figura 2-2 são apresentados dois exemplos de geometrias de ressonador. Infelizmente, modelos analíticos para esse tipo de filtro nem sempre são facilmente estabelecidos. Uma solução é a partir de um modelo aproximado, realizar simulações para obter caracterização numérica, determinando a resposta em frequência do circuito e identificando os parâmetros que influenciam o seu comportamento. Por outro lado, a disponibilidade de recursos computacionais e o desenvolvimento de programas computacionais para simulação eletromagnética (*computer-aided design, CAD*) têm revolucionado o projeto de filtros e várias estruturas têm sido propostas.



(a) Filtro SIR modificado [25]



(b) Ressonador em forma de C [26]

Figura 2-2 – Exemplos de geometria de ressonadores.

Mediante essas observações, procurando atender às especificações dos atuais sistemas de telecomunicações e por considerar importante o estudo de filtros em microfita, a presente dissertação tem o objetivo de investigar o comportamento dos filtros em microfita baseados na geometria matrioska. Basicamente, essas

estruturas funcionam como um ressonador, sendo possível obter dimensões reduzidas e resposta em frequências com especificações atrativas, destacando-se: rápida transição da banda passante para a banda de rejeição e ajuste da largura de banda.

Os filtros elétricos são subdivididos em algumas categorias. Esses filtros podem ser classificados: em passivos, ativos, analógicos, digitais, micro-ondas, entre outros [11], [27]–[31].

Basicamente, filtros são circuitos que deixam passar sinais de determinadas frequências e suprime as outras, Figura 2-3. Os filtros são ainda classificados quanto à tecnologia e componentes empregados em sua construção [27]–[31].

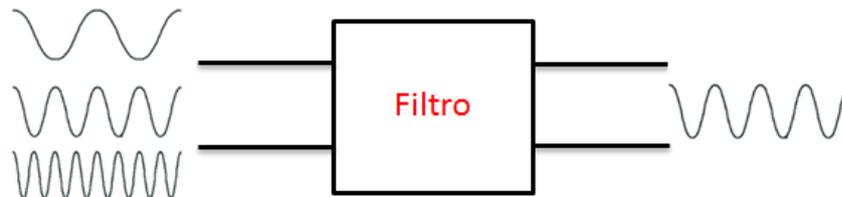


Figura 2-3 – Simbologia de um filtro.

Os filtros passivos são construídos apenas com elementos passivos dos circuitos, ou seja, resistores, capacitores e indutores, Figura 2-4.



Figura 2-4 – Filtro passivo [31].

Os filtros ativos utilizam na sua construção elementos passivos associados a algum elemento ativo, como os transistores e amplificadores, Figura 2-5[31].

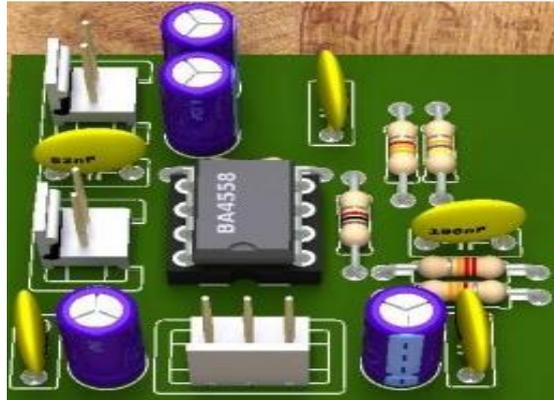


Figura 2-5 — Filtro ativo [33].

Os filtros digitais empregam tecnologia digital na sua construção implementados através da programação de um sistema geralmente microprocessado [31].

Uma das características mais importante de um filtro é a resposta em frequência, na qual identifica o tipo do filtro, geralmente classificados em: passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa, Figura 2-6 [30], [31].

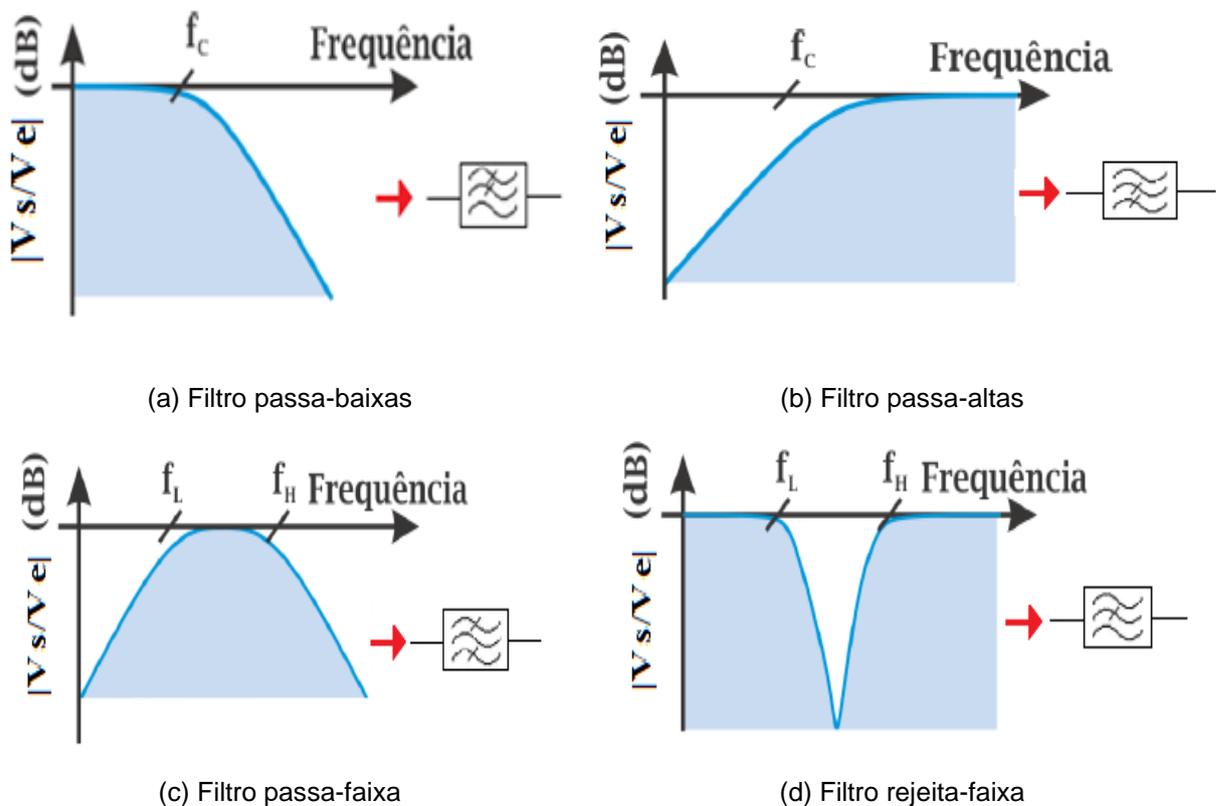


Figura 2-6 — Resposta em frequência dos filtros reais [31].

Os filtros passa-baixas são dispositivos, ou circuitos, que permitem a passagem de sinais abaixo de uma determinada frequência, denominada frequência de corte (f_c), e os sinais com frequências superiores são atenuados. Dessa maneira, tem característica principal atenuar as altas frequências, permitindo a passagem das baixas frequências. A frequência de corte de um filtro é definida como sendo aquela para qual a potência do sinal de saída sofre uma atenuação de 3dB em relação ao máxima potência do sinal de saída, o que corresponde à metade da máxima tensão de saída [27]–[31].

O princípio de funcionamento do filtro passa-alta é o oposto do filtro passa-baixa. O filtro passa-altas permite a passagem das componentes de altas frequências e atenua as componentes de baixas frequências [27]–[31].

O filtro passa-faixa permite a transmissão de sinais em uma faixa de frequência específica. Os sinais com frequências fora dessa faixa, tanto abaixo como acima, são atenuados. Por outro lado, o filtro rejeita-faixa atenua os sinais em uma faixa de frequência específica, deixando passar os sinais fora dessa faixa [27]–[31].

Diferentemente do caso ideal, na resposta em frequência dos filtros reais, destacam-se três tipos de bandas: banda de passagem, banda de transição e banda de rejeição, Figura 2-7 [31].

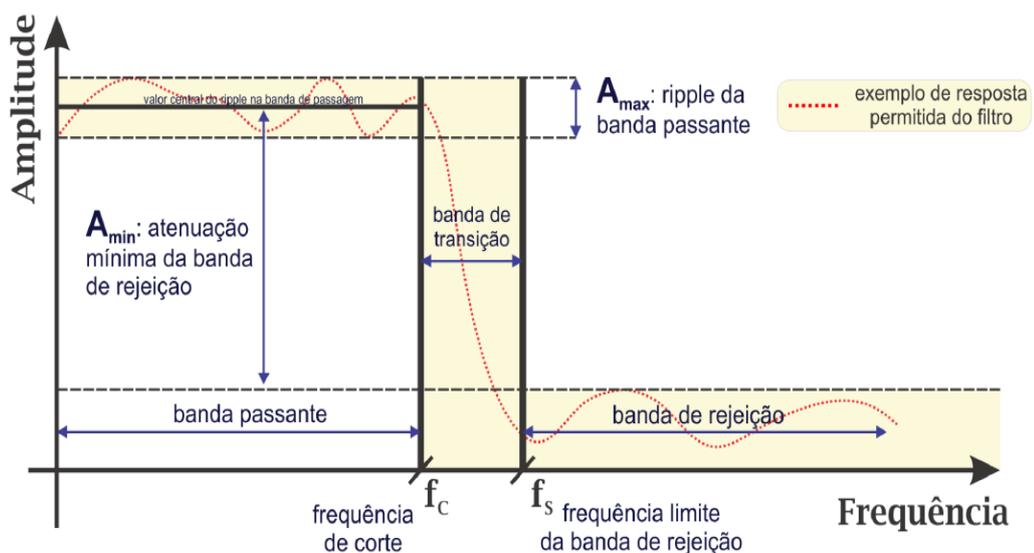
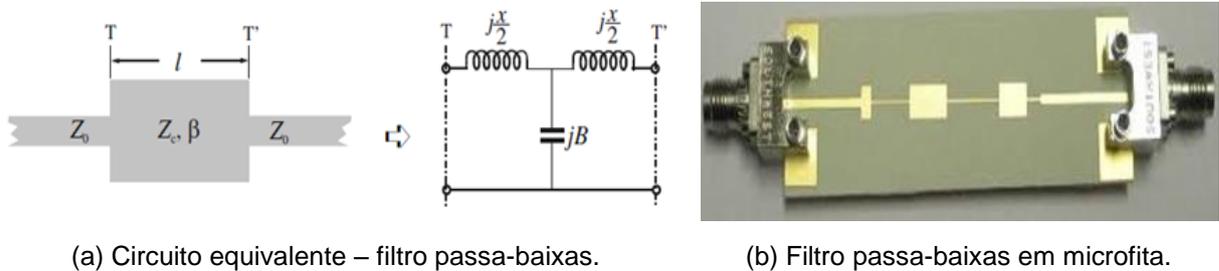


Figura 2-7 — Tipos de bandas na resposta em frequência dos filtros [31].

Outra classificação dos filtros é quanto à utilização de componentes concentrados e distribuídos. Quando a dimensão física dos componentes do filtro é muito menor que o comprimento de onda correspondente à sua frequência de operação, os filtros podem ser implementados utilizando-se componentes resistivos, indutivos e capacitivos concentrados, Figura 2-8 [34]. Entretanto, quando a dimensão física dos componentes do circuito é da ordem do comprimento de onda, a utilização de componentes concentrados não se torna mais viável e, neste caso, os filtros são fabricados utilizando-se componentes distribuídos, onde apenas a geometria da estrutura guiante determina o comportamento equivalente aos circuitos L-C, Figura 2-9 [11], [35].



Figura 2-8 – Exemplos de componentes concentrados – Resistor e capacitor.



(a) Circuito equivalente – filtro passa-baixas.

(b) Filtro passa-baixas em microfita.

Figura 2-9 – Filtro passa-baixas utilizando componentes distribuídos [11].

2.1 Filtros de micro-ondas

O termo faixa de frequência de micro-ondas originou-se durante a Segunda Guerra Mundial. No entanto, devido à forma como essas faixas eram codificadas, gerou-se certa confusão, apesar dos padrões existentes, IEEE e ITU [36], [37]. A padronização da frequência de micro-ondas está na faixa de 0,3 a 300 GHz, porém, na prática, se considera uma faixa que varia de 1 a 30 GHz.

Fisicamente, os filtros que operam na faixa de frequência de micro-ondas são constituídos de elementos distribuídos, tais como, linhas de transmissão ou guias de

ondas, podendo ser aplicados em radares, satélites de comunicação espacial, comunicações móveis, etc. [30].

Filtros de micro-ondas implementados através de linhas de transmissão planares, que incluem a microfita, possuem características desejáveis como facilidade de construção, geometria reduzida e baixo custo de fabricação. A microfita destaca-se por ser comumente empregada nessa categoria de filtro, proporcionando versatilidade, além de ser largamente estudada tanto do ponto de vista teórico quanto prático [38]-[42].

Aspectos físicos da microfita são mostrados na Figura 2.10, sendo constituída basicamente por uma fita condutora sobre um substrato dielétrico, limitado por um plano terra.

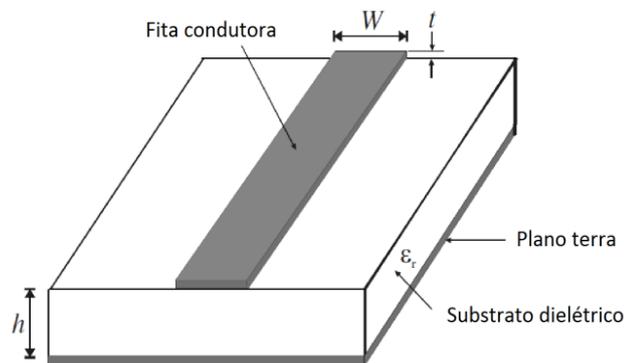
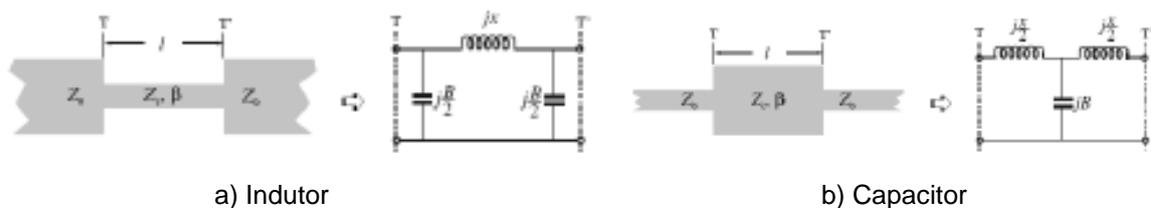
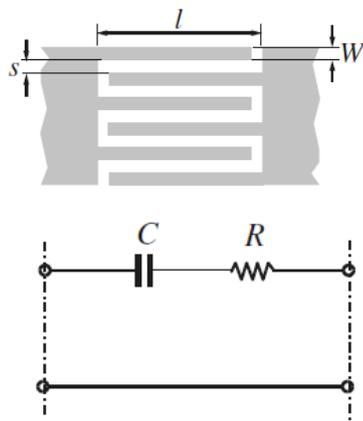


Figura 2-10 – Geometria da microfita [11].

Na Figura 2-10, fatores como impedância, constante dielétrica efetiva e velocidade de propagação dependem de seus parâmetros (W , h , ϵ_r) e da frequência de operação. Assim, uma descontinuidade na geometria pode ser equivalente a um circuito, como apresentado na Figura 2-11.





c) Capacitor interdigital

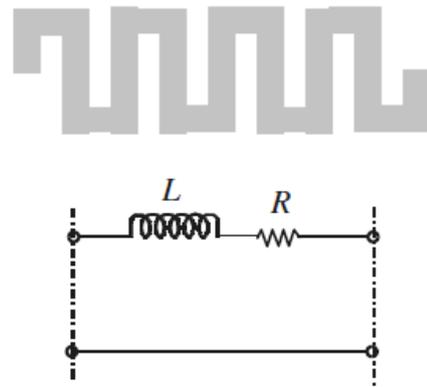
d) Linha com reentrância, *meander line*

Figura 2-11 – Exemplos de equivalências em microfita [11].

Embora a investigação feita nesta dissertação, explore a microfita, outras estruturas planares são largamente utilizadas na implementação de filtros micro-ondas, podendo ser utilizada de forma separada ou em conjunto com as microfitas [10], [11].

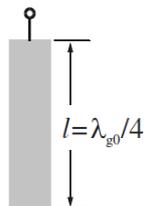
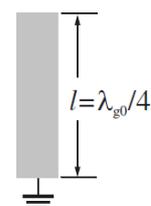
Dentre os circuitos utilizados, os ressonadores recebem uma especial atenção [11]. Existem diversas geometrias de ressonadores planares, podendo ser classificados em concentrados, quase concentrados, em linha e em *patch*. Na Figura 2-12 são apresentados alguns exemplos de configurações de ressonadores. A escolha da configuração depende do tipo de filtro desejado, da técnica de fabricação, das perdas aceitáveis, bem como a frequência de operação.



a) Ressonador com componentes concentrados



b) Ressonador com componentes quase concentrado

c) Ressonador de $\lambda_g/4$ aberto (open-circuited stud)d) Ressonador de $\lambda_g/4$ em curto (short-circuited stud)

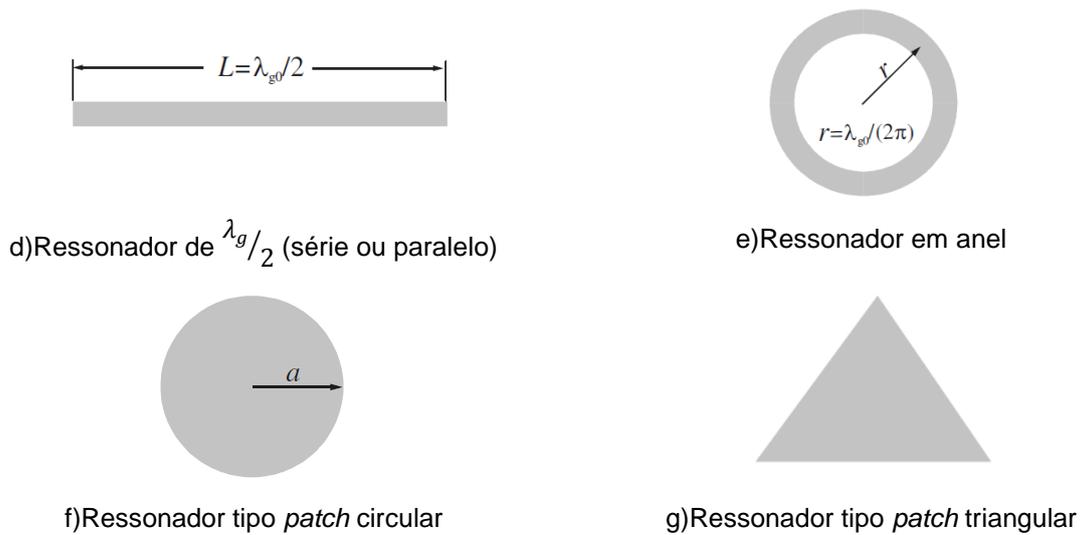


Figura 2-12 – Diferentes configurações de ressonadores [11].

2.2 Geometria matrioska

A geometria matrioska aplicada nesta dissertação é implementada utilizando uma microfita, com substrato de altura h e constante dielétrica ϵ_r . A geometria é baseada em anéis quadrados com alimentação simétrica para facilitar a análise dos resultados.

Considere-se inicialmente a geometria com um anel quadrado, aberto, alimentada por duas fitas simétricas, Figura 2-13. Essa estrutura também conhecida como ressonador em forma de C [24] corresponde a um filtro rejeita faixa e tem a sua ressonância dada por:

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

em que, L_{ef} representa o comprimento médio do anel, dado por:

$$L_{ef} = \frac{4(L1_{int} + L1_{ext})}{2} - g \quad (2)$$

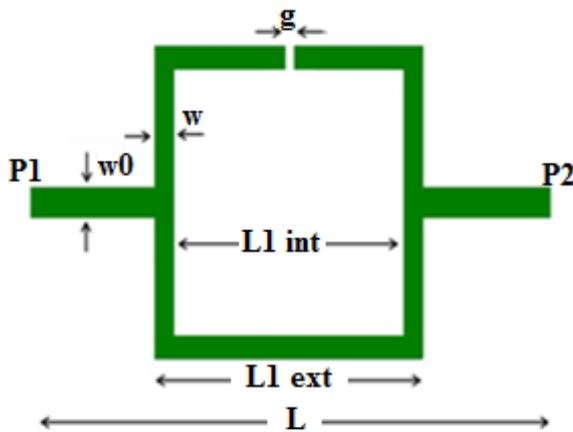
e ϵ_{ref} é a constante dielétrica efetiva para o caso quase-estático, que pode ser calculada utilizando aplicativos como o AppCAD [43], ou aplicando diretamente (3)–(6), apresentadas em [11].

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{u}\right)^{-ab} \quad (3)$$

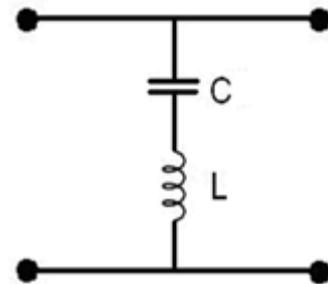
$$u = \frac{W}{h} \quad (4)$$

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left(\frac{u^4 + \left(\frac{u}{52}\right)^2}{u^4 + 0,432} \right) + \frac{1}{18,7} \ln \left(1 + \left(\frac{u}{18,1}\right)^3 \right) \quad (5)$$

$$b = 0,564 \left(\frac{\epsilon_r - 0,9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0,053} \quad (6)$$



(a) Ressonador em forma de C

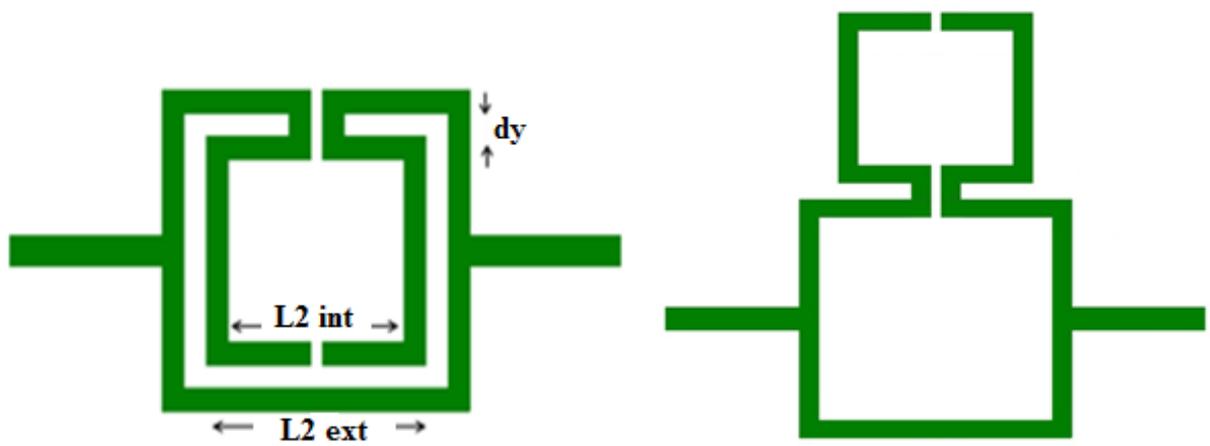


(b) Circuito equivalente

Figura 2-13 – Ressonador em forma de C e circuito equivalente.

O ressonador em forma de C, Figura 2-13, trata-se de um ressonador de um comprimento de onda, ou seja, $L_{ef} \approx \lambda_g$.

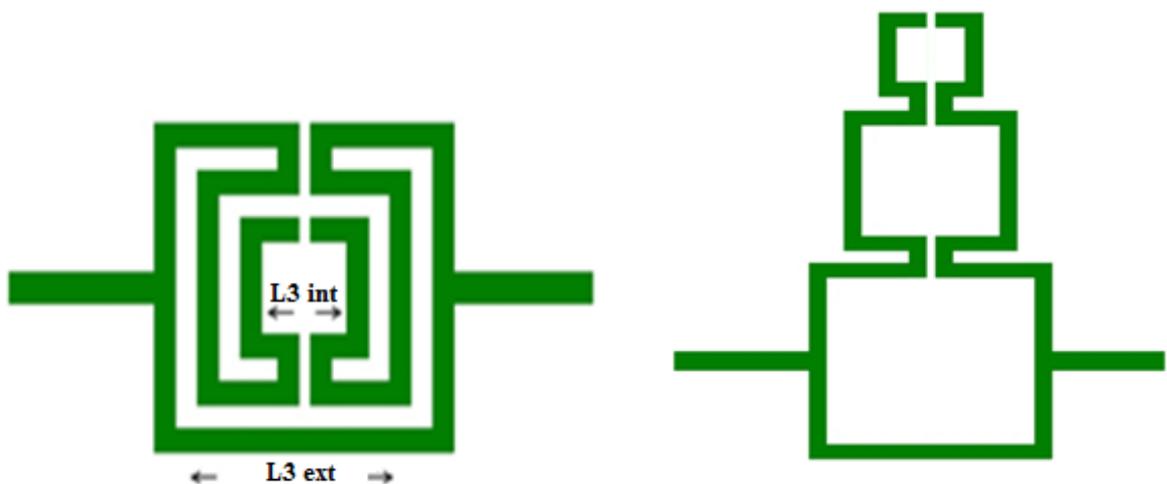
Na geometria matrioska os anéis permanecem interligados, dando origem a um único anel equivalente, com um maior comprimento efetivo e, conseqüentemente, menor frequência de ressonância, Figura 2-14 e Figura 2-15. Para se obter uma determinada resposta em frequência, considerando uma mesma área ocupada pela geometria, é possível variar parâmetros tais como as dimensões dos anéis internos, o espaçamento entre os anéis, número de anéis, etc. Entretanto, à medida que o número de anéis aumenta, passam a ocorrer acoplamentos entre os mesmos e o circuito equivalente não é tão simples como o ilustrado na Figura 2-13.



(a) Geometria matrioska com 2 anéis

(b) Geometria matrioska expandida

Figura 2-14 – Geometria matrioska para 2 anéis.



(a) Geometria matrioska com 3 anéis

(b) Geometria matrioska expandida

Figura 2-15 – Geometria matrioska para 3 anéis.

A geometria com dois e três anéis correspondem a um ressonador de meio comprimento de onda, ou seja, $L_{ef} \approx \frac{\lambda_g}{2}$.

Para a geometria com dois e três anéis, as expressões para o cálculo das frequências de ressonância ficam mais limitadas, em função dos acoplamentos existentes. Essas expressões são descritas capítulo 3.

3 FILTROS DE UMA SEÇÃO: RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o programa computacional ANSYS designer 8.0 [44]. Em todas as simulações foram adotadas as especificações descritas na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Parâmetros utilizados na simulação.

Materiais e dimensões	Parâmetros adotados
Substrato FR-4	Altura 1,5 mm; Constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$; Tangente de perdas 0,02.
Portas 1 e 2	Impedância característica de 50Ω correspondendo a $W_0 = 2,8$ mm.
Largura da fita dos anéis	$W = 2,0$ mm
Fenda	$g = 1,0$ mm
Distância entre as portas 1 e 2	$L = 74$ mm (valor esse independente das dimensões ou do número de anéis).
Atenuação para cálculo da largura de banda	-10 dB
Atenuação mínima na banda de transição (região de transição)	-3 a -30 dB

Feitas as simulações, a próxima etapa consistiu na fabricação dos filtros selecionados no intuito de comparar os resultados medidos e simulados. Na Figura 3-1 é ilustrado um exemplar dos filtros fabricados.

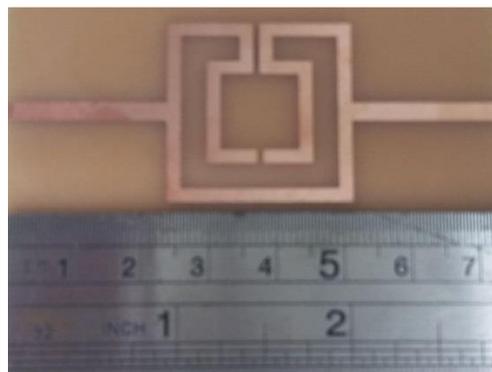


Figura 3-1 – Exemplo de filtro fabricado.

Após o processo de fabricação, realizaram-se medições no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA/IFPB, utilizando um analisador de redes Agilent E5071C, mostrado na Figura 3-2.

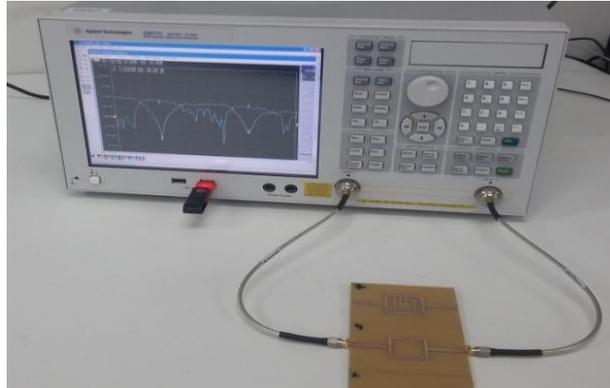
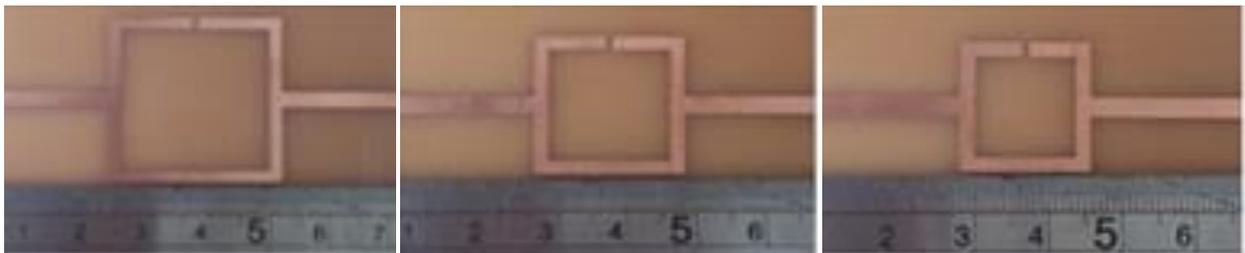


Figura 3-2 – Configuração dos equipamentos utilizados na caracterização experimental.

3.1 Filtros com um anel

A Figura 3-3 apresenta os filtros ressonadores de um anel, com L_{1ext} assumindo os seguintes valores: 30 mm, 22 mm e 18 mm, na faixa de frequência até 6 GHz. As respostas em frequência para essas estruturas são apresentadas em Figura 3-4, $|S_{21}|$, caracterização numérica dos filtros de uma seção.



(a) $L_{1ext} = 30$ mm

(b) $L_{1ext} = 22$ mm

(c) $L_{1ext} = 18$ mm

Figura 3-3 – Ressonadores com um anel, de 30 mm, 22 mm e 18 mm.

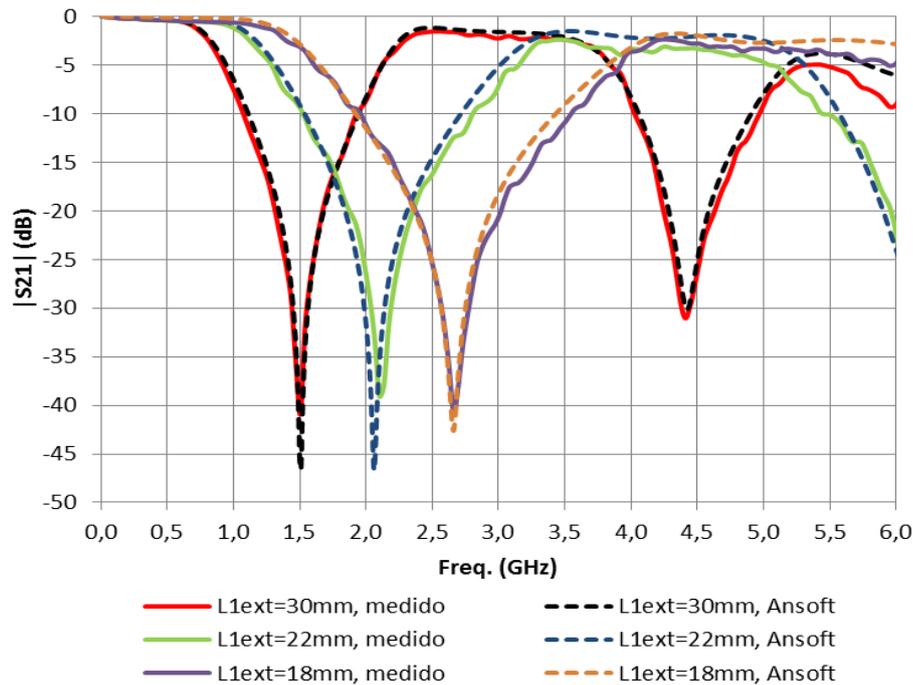


Figura 3-4 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonadores com um anel, de 30 mm, 22 mm e 18 mm.

Para a faixa de frequência em torno da primeira frequência de ressonância observa-se um comportamento como filtro rejeita-faixa. Observa-se uma excelente concordância entre os resultados experimentais e numéricos.

Para as respostas dos filtros rejeita-faixa com um anel, a largura de banda diminui com o aumento das dimensões do anel. Essas características estão resumidas na Tabela 3-2.

Na Figura 3-5 são comparados os valores da frequência de ressonância calculados usando (1) e determinados usando o programa computacional ANSYS designer 8.0, para valores de L_{1ext} variando de 12 mm a 30 mm, verificando-se uma concordância muito boa entre os resultados.

Tabela 3-2 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador com um anel.

	L1ext = 30mm	L1ext = 22mm	L1ext = 18mm
fr (GHz)	1,505	2,100	2,660
Região de transição (GHz)	0,595	0,875	1,120
BW (GHz)	0,840	1,259	1,575

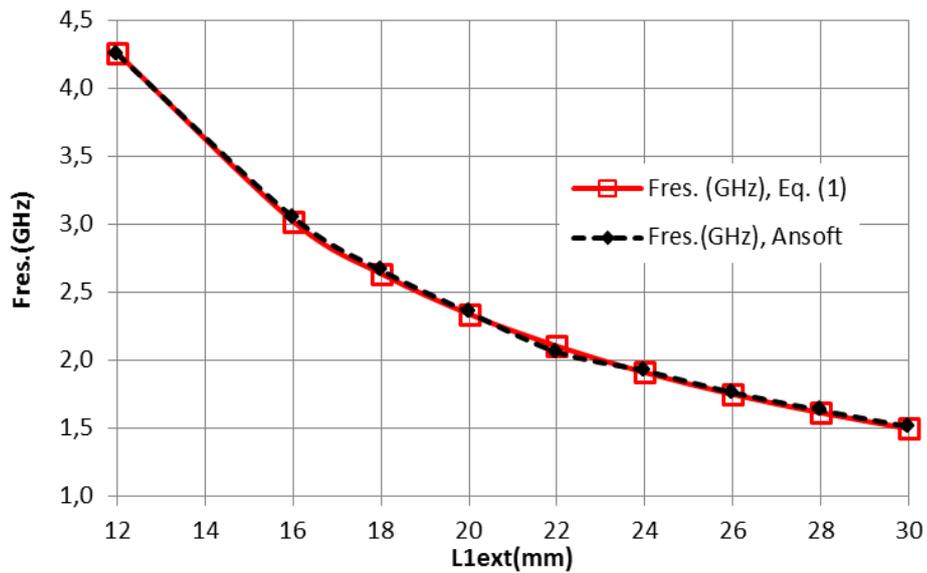


Figura 3-5 – Comparação entre os valores calculados para a frequência de ressonância – Equação (1) ANSYS Designer 8.0.

3.2 Filtro com dois anéis

A Figura 3-6, apresenta os filtros com dois anéis matrioska, com dimensão fixa do anel externo de 28 mm, e o anel interno com dimensão variável, na faixa de frequência até 3 GHz. A Figura 3-7, apresenta as respostas em frequência obtidas na caracterização numérica da estrutura com uma seção. São observadas duas ressonâncias distintas na banda de rejeição, sendo essas mais próximas, quanto mais próximas forem as dimensões dos anéis.

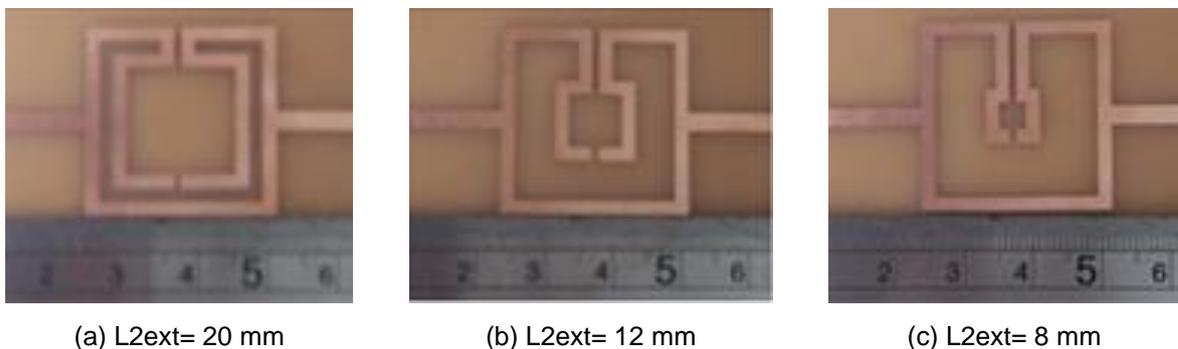


Figura 3-6 – Ressonadores com dois anéis.

Comparando com os ressonadores com apenas um anel, verifica-se que as estruturas com dois anéis apresentam a primeira frequência de ressonância com uma redução de aproximadamente 57%, de 1,63 GHz para 0,70 GHz, sem aumentar

a área ocupada pelo filtro. Destaque-se ainda a considerável redução da região de transição e da banda passante. Na Tabela 5-2 são resumidas as características observadas.

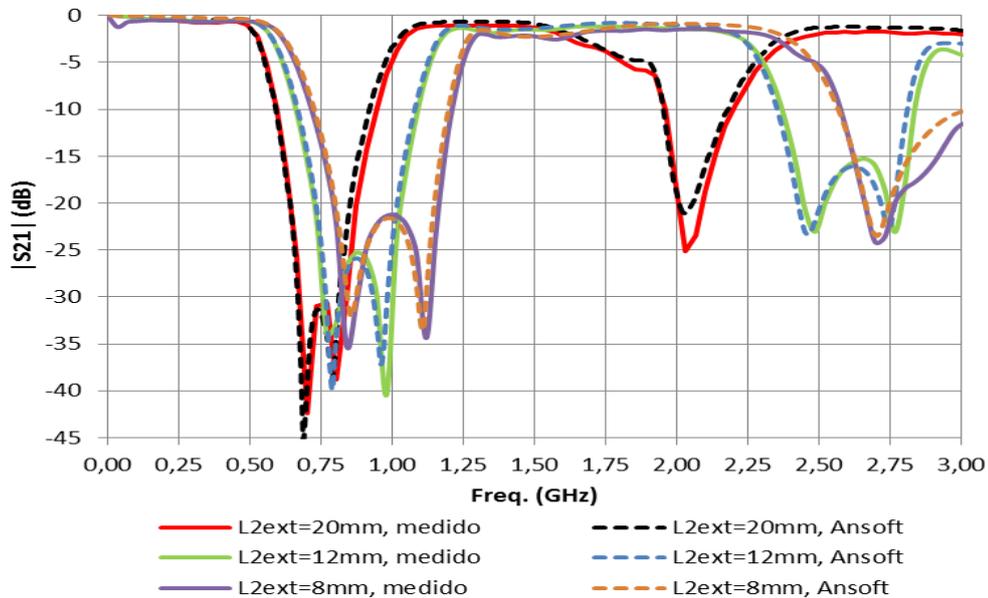


Figura 3-7 — $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonadores com dois anéis, L_{2ext} de 20 mm, 12 mm e 8 mm.

Tabela 3-3 — Características observadas para a resposta em frequência do ressonador com dois anéis.

	$L_{2ext} = 20\text{mm}$	$L_{2ext} = 12\text{mm}$	$L_{2ext} = 8\text{mm}$
fr_1 (GHz)	0,700	0,770	0,840
fr_2 (GHz)	0,805	0,980	1,120
Região de transição (GHz)	0,140	0,175	0,210
BW (GHz)	0,350	0,420	0,490

Para a geometria com dois anéis, as expressões para o cálculo das frequências de ressonância ficam mais limitadas. Baseado em (1), são propostas expressões para a primeira e a segunda frequência de ressonância, modificando-se o comprimento efetivo. Para a primeira ressonância, o comprimento efetivo, L_{ef1} , é dado por:

$$L_{ef1} = 2 \times (3 \times (L_{1int} + L_{2int}) + dy) \quad (7)$$

Para a segunda ressonância, o comprimento efetivo, L_{ef2} , é dado por:

$$L_{ef2} = 2 \times (3 \times L1_{int} + 2 \times L2_{int}) \quad (8)$$

Na Figura 3-8 são comparadas as frequências de ressonância calculadas a partir de (7) e (8), aplicados em (1) e determinadas com o programa computacional ANSYS Designer 8.0, para valores de $L2_{ext}$ variando de 8 mm a 20 mm. Com uma máxima diferença de aproximadamente 6% entre os resultados, as equações propostas fornecem bons valores iniciais para um processo de otimização.

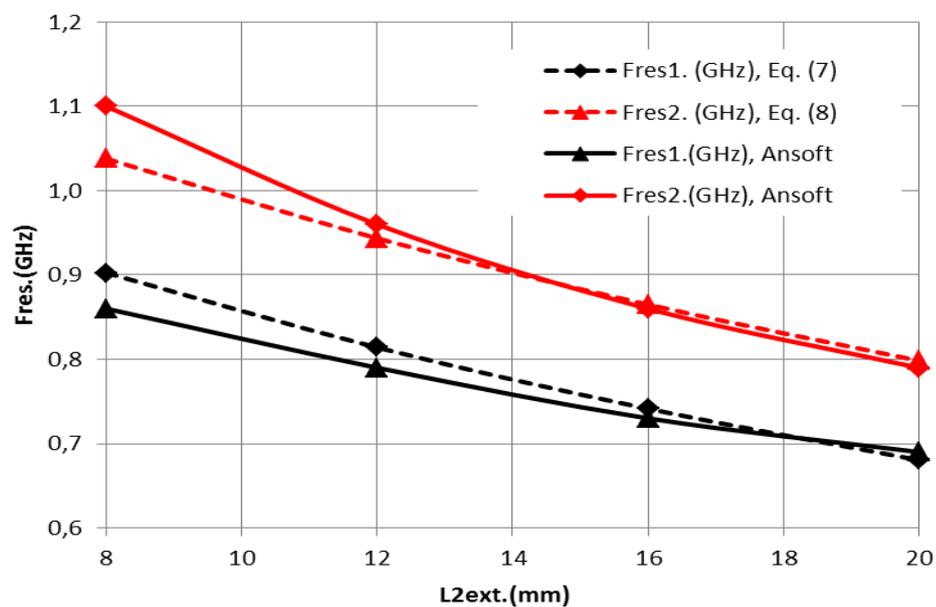


Figura 3-8 – Comparação entre os valores calculados para as frequências de ressonância – $L1_{ext}=28$ mm, equações (7) e (8), ANSYS designer 8.0.

3.3 Filtro com três anéis

Na Figura 3-9 são mostrados dois ressonadores com geometria matrioska de três anéis, para faixa de frequência até 3 GHz. As respostas em frequência dessas estruturas são apresentadas na Figura 3-10, verificando-se uma concordância muito boa entre resultados numéricos e medidos.

Fazendo novamente a comparação com os ressonadores com apenas um anel, observa-se que as estruturas com três anéis apresentam a primeira frequência de ressonância com uma redução de aproximadamente 66%, de 1,63 GHz para 0,54 GHz (L_{ext} de 28 mm), conservando a mesma área ocupada pelo filtro com apenas um anel. A região de transição e a banda passante ficam mais reduzidas ainda, mesmo quando comparadas às estruturas com dois anéis. Entretanto, constata-se

que, como esperado, de dois para três anéis a variação é menor que de um para dois anéis. Isto ocorre porque à medida que se aumenta o número de anéis a variação do comprimento efetivo diminui. Na Tabela 3-4 são resumidas as características da resposta em frequência da estrutura com três anéis.



(a) $L_{1ext}=36$ mm, $L_{2ext}=28$ mm, $L_{3ext}=20$ mm (b) $L_{1ext}=28$ mm, $L_{2ext}=20$ mm, $L_{3ext}=12$ mm

Figura 3-9 – Ressonadores com três anéis.

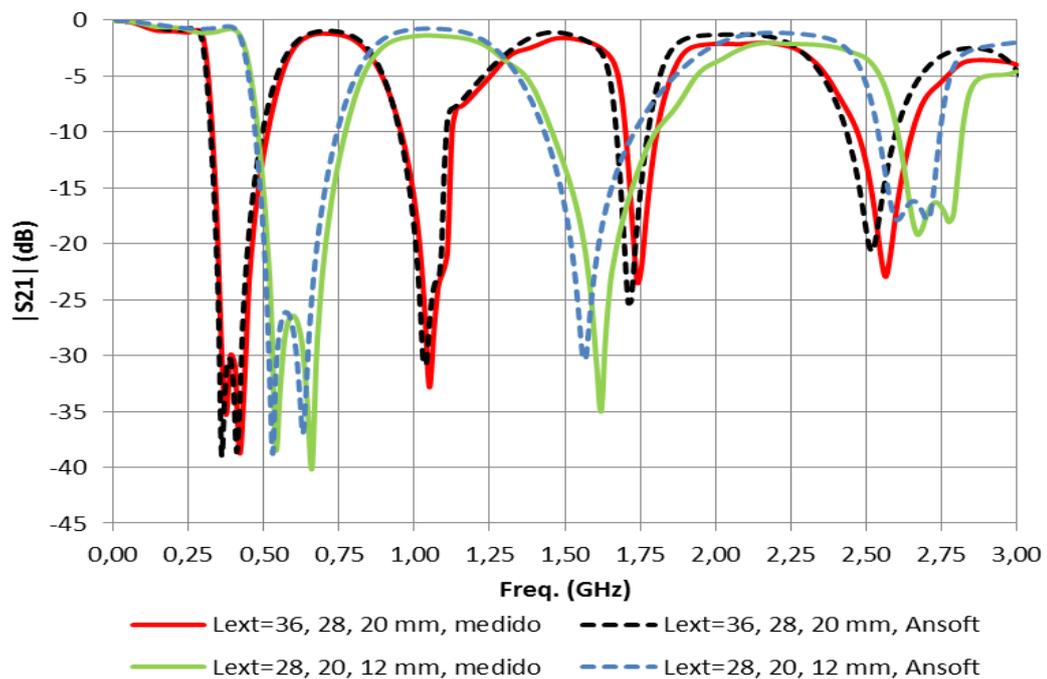


Figura 3-10 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonadores com três anéis.

Tabela 3-4 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador com três anéis.

	L1ext=36 mm, L2ext= 28 mm, L3ext= 20 mm	L1ext=28 mm, L2ext= 20 mm, L3ext=12mm
fr1 (GHz)	0,375	0,540
fr2 (GHz)	0,420	0,660
Região de transição (GHz)	0,050	0,060
BW (GHz)	0,180	0,300

De maneira análoga à estrutura com dois anéis, são propostas expressões aproximadas para o cálculo do comprimento efetivo do anel, com as quais é possível calcular as duas primeiras frequências de ressonâncias. Para a primeira ressonância, o comprimento efetivo, L_{ef1} , é dado por:

$$L_{ef1} = 2 \times (3 \times (L1_{int} + L2_{int} + L3_{int}) + 2 \times dy) \quad (9)$$

Para a segunda ressonância, o comprimento efetivo, L_{ef2} , é dado por:

$$L_{ef2} = 2 \times (3 \times (L1_{int} + L2_{int}) + 2 \times L3_{int})$$

Com base nas Equações (9) e (10), para o anel com $L1_{ext} = 36$ mm, são obtidos 0,377 GHz e 0,423 GHz, para a primeira e a segunda frequência de ressonância, respectivamente. Já para $L1_{ext} = 28$ mm os valores calculados são 0,561 GHz e 0,649 GHz. Na Figura 3-11 são comparadas as frequências de ressonância calculadas a partir de (9) e (10), aplicados em (1) e determinadas com o programa computacional ANSYS Designer 8.0, para valores de $L1_{ext}$ 36mm e L_{ext} 28 mm. Com uma máxima diferença de aproximadamente 6% entre os resultados, as equações propostas fornecem bons valores, o que é uma boa aproximação inicial.

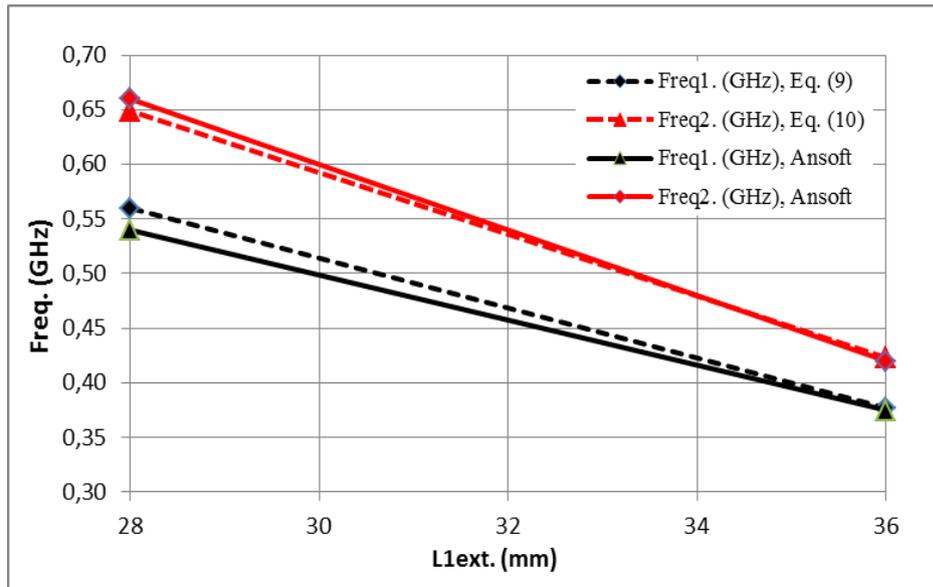


Figura 3-11 — Comparação entre os valores calculados para as frequências de ressonância – $L1_{ext}=36$ mm e $L1_{ext}=28$ mm, equações (9) e (10), ANSYS designer 8.0.

3.4 Conclusão da análise dos filtros com uma seção

Analisada a aplicação da geometria matrioska aos filtros em microfita, operando basicamente como um ressonador, obteve-se uma considerável redução na frequência de ressonância, chegando até 66%, quando comparados estruturas de um anel com uma mesma área. Além disso, é possível se obter rápidas transições da banda passante para a banda de rejeição e controlar a largura da banda de rejeição.

As expressões para o cálculo inicial das duas primeiras ressonâncias da geometria matrioska com dois e três anéis apresentaram uma máxima diferença de 6%, quando comparados aos resultados obtidos pelo programa computacional ANSYS designer 8.0, o que é um bom valor inicial para um projeto iterativo. Os resultados numéricos e medidos apresentados nesta dissertação tiveram uma concordância muito boa.

A seguir, no capítulo 4, é apresentada uma investigação de como a colocação de duas seções pode ser utilizada para se obter determinadas características de resposta em frequência.

4 FILTROS COM DUAS SEÇÕES EM CASCATA: RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de iniciar as investigações das características obtidas com a utilização de filtros com duas seções, são propostos dois tipos de estruturas em cascata: estruturas de mesma geometria, Figura. 4-1, e estruturas com geometrias diferentes, Figura. 4-2.

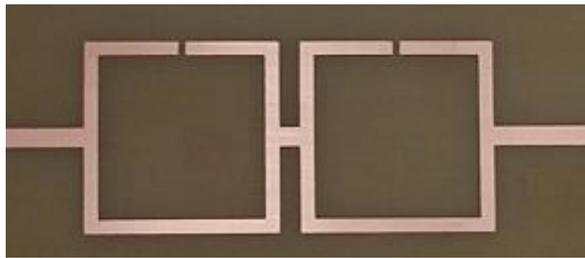


Figura 4-1 – Exemplo de estruturas em cascata de mesma geometria.

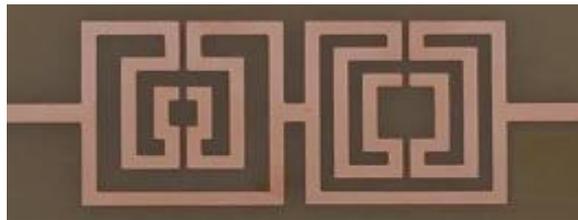


Figura 4-2 – Exemplo de estruturas em cascata com geometrias diferentes.

Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o programa computacional ANSYS designer 8.0. Para todas as simulações são adotadas as especificações descritas na Tabela 4-1.

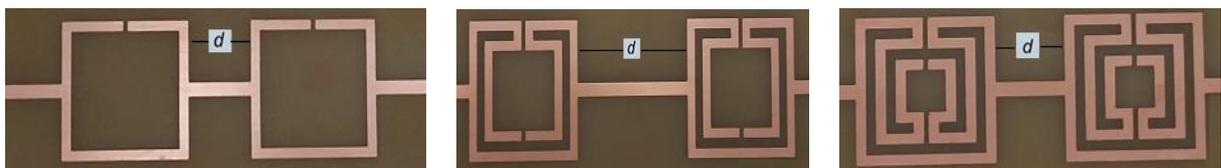
Inicialmente, foram realizadas simulações numéricas e, posteriormente, selecionadas estruturas para avaliar a coerências entre os resultados numéricos e os resultados experimentais obtidos. Foram consideradas apenas duas estruturas em cascata, com diferentes números de anéis.

Tabela 4-1— Parâmetros utilizados na simulação.

Materiais e dimensões	Parâmetros adotados
Substrato FR-4	Altura 1,5 mm; Constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$; Tangente de perdas 0,02.
Portas de 1 e 2	Impedância característica de 50Ω correspondendo a $W_0 = 2,8$ mm.
Largura da fita dos anéis	$W = 2$ mm
Fenda	$g = 1,0$ mm
Distância entre as portas 1 e 2	$L = 125$ mm (valor esse independente das dimensões ou do número de anéis).
Atenuação para cálculo da largura de banda	-10 dB
Atenuação mínima na banda de transição (região de transição)	-3 a -30 dB

4.1 Estruturas em cascata de mesma geometria

Como uma primeira etapa, foi feito um estudo da distância entre as estruturas, d , variando de 3 mm a 30 mm, Figura 4-3.



(a) Filtro com um anel

(b) Filtro com dois anéis

(c) Filtro com três anéis

Figura 4-3 — Exemplos de filtros com estruturas em cascata de mesma geometria variando a distância.

A Figura 4-4 apresenta os resultados em frequência obtidos na caracterização numérica para os filtros com um anel ressonador em cascata com $L_{1ext} = 22$ mm, na faixa de frequência até 4 GHz, variando a distância entre os ressonadores de 3 mm até 30 mm.

Analisando as respostas em frequência com a variação da distância entre os ressonadores, observar-se um comportamento não desejado para a estrutura, com

oscilações antes e depois da banda de rejeição. Com finalidade de detalhar a análise das estruturas, foram analisados três ressonadores em cascata com um anel, tendo sido selecionados Lext 28 mm, e distâncias 3 mm, 14 mm e 28 mm.

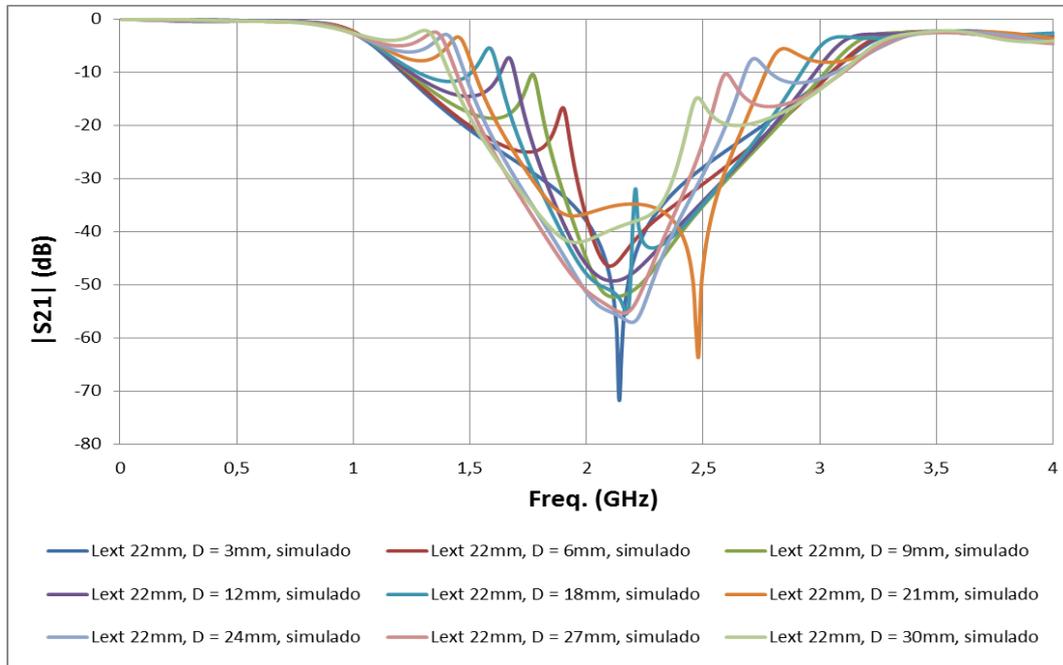


Figura 4-4 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonadores com um anel em cascata, Lext de 22 mm, variando a distância de 3 mm até 30mm.

Como referência, seja considerado o ressonador com um único anel matrioska, sendo Lext 28 mm, conforme a Figura. 4-5, na faixa de frequência até 6 GHz. A Figura 4-6 mostra a resposta em frequência para valores numéricos e medidos, observando-se uma excelente concordância entre os resultados, com frequência de ressonância de 1,641 GHz. Na Tabela 4-2 são descritos as características resumidas dos resultados simulados.

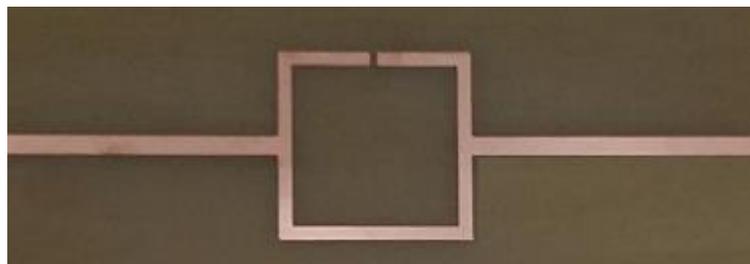


Figura 4-5 – Ressonador com um anel Lext 28mm.

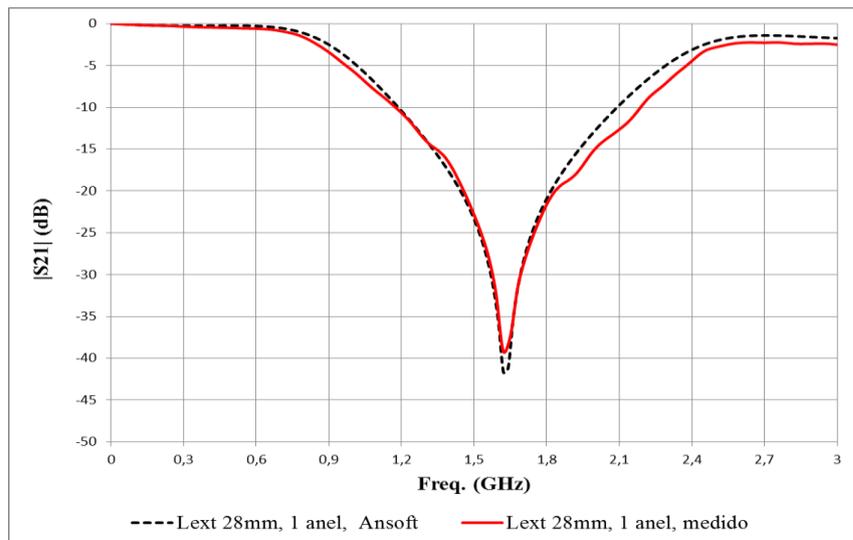


Figura 4-6 — $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador com um anel Lext 28mm.

Tabela 4-2 — Características observadas para a resposta em frequência do ressonador com um anel, Lext de 28mm.

	Lext= 28mm
f_{r1} (GHz)	1,641
Região de transição (GHz)	0,64
BW (GHz)	0,86

Considerando a estrutura em um único anel com duas seções, distância entre os ressonadores de 3 mm, Figura 4-7, na faixa de frequência até 3 GHz, observa-se uma excelente concordância entre os resultados medido e simulado, com frequência de ressonância de 1,521 GHz, Figura 4-8. Na Tabela 4-3 são descritas as características resumidas dos resultados simulados. Comparado com o filtro com um único anel, verifica-se que a máxima atenuação aumentou em aproximadamente 10 dB de 40 dB para 50 dB. Além disso, ocorre uma redução da frequência de ressonância de 1,641 GHz para 1,521 GHz, e um aumento da banda de rejeição, de 0,86 GHz para 1,38 GHz, provavelmente em função do acoplamento entre os anéis, devido à proximidade dos mesmos.

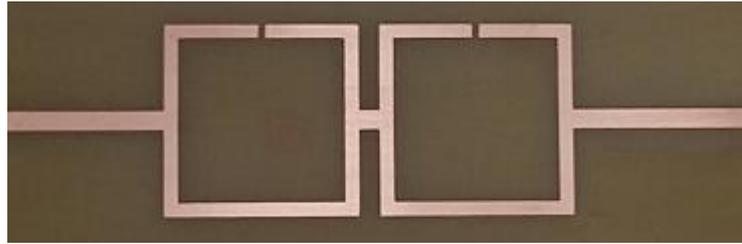


Figura 4-7 – Ressonador em cascata com um anel, Lext de 28 mm e distância de 3 mm.

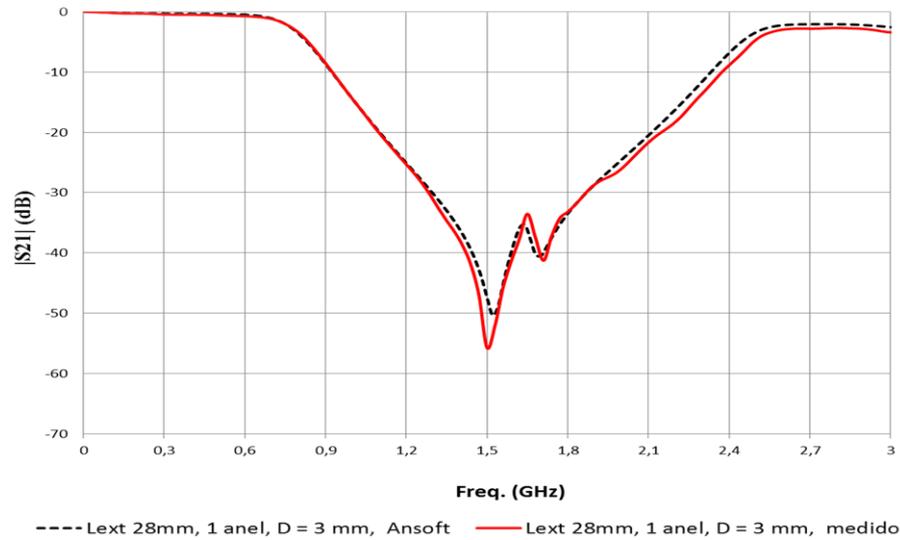


Figura 4-8— $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com um anel, Lext de 28 mm e distância de 3 mm.

Tabela 4-3 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com um anel Lext de 28mm e distância de 3mm.

	Lext = 28 mm D = 3 mm
f_{r1} (GHz)	1,521
Região de transição (GHz)	0,500
BW (GHz)	1,380

Considerando a estrutura em um único anel com duas seções, distância entre os ressonadores de 14 mm, conforme a Figura 4-9, na faixa de frequência até 3 GHz, verifica-se novamente uma excelente concordância entre os resultados medido e simulado, com frequência de ressonância de 1,621 GHz, Figura 4-10. Na Tabela 4-4 são descritas as características resumidas dos resultados simulados. Porém, ocorre uma ressonância em aproximadamente 1,20 GHz, o que compromete a resposta em frequência desejada.

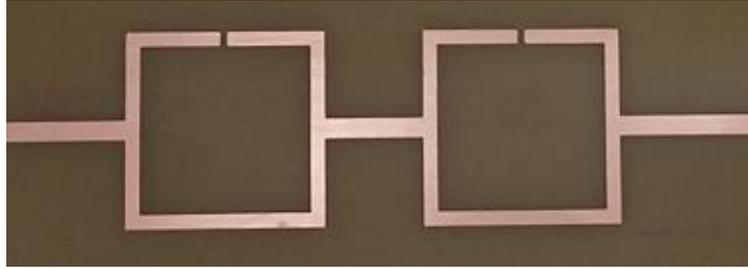


Figura 4-9 – Ressonador em cascata com um anel, Lext de 28 mm e distância de 14 mm.

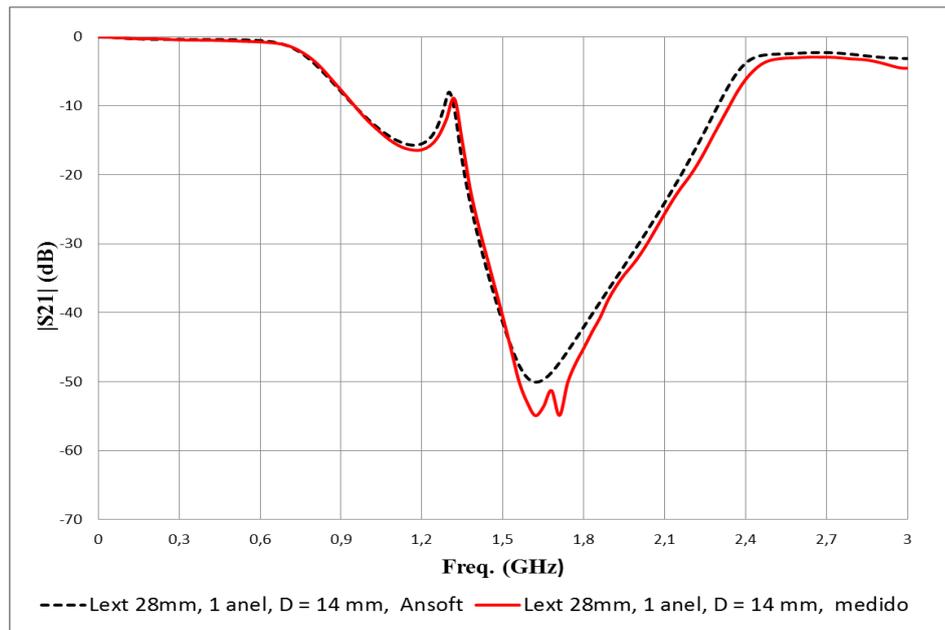


Figura 4-10 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com um anel, Lext de 28 mm e distância de 14 mm.

Tabela 4-4 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com um anel, Lext de 28mm e distância de 14mm.

	Lext = 28 mm D = 14 mm
f_{r1} (GHz)	1,621
Região de transição (GHz)	0,640
BW (GHz)	1,320

Para a estrutura com duas seções, distância entre os ressonadores de 28 mm, conforme a Figura 4-11, na faixa de frequência até 3 GHz, a resposta em frequência é apresentada na Figura 4-12, com frequência de ressonância de 1,621 GHz. Na Tabela 4-5 são descritas as características resumidas dos resultados simulados. Observa-se um maior desacoplamento entre as seções, com uma maior atenuação

e uma frequência de ressonância mais próxima da frequência de ressonância do filtro com um único anel.

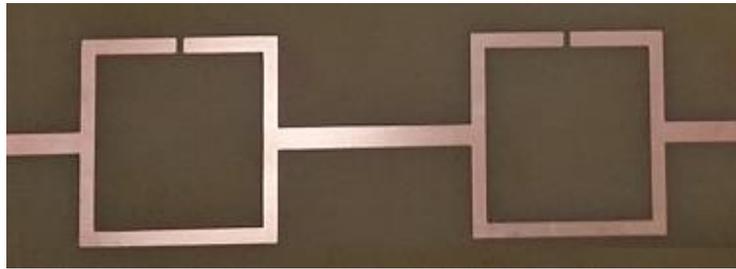


Figura 4-11 – Ressonador em cascata com um anel, Lext de 28 mm e distância de 28 mm.

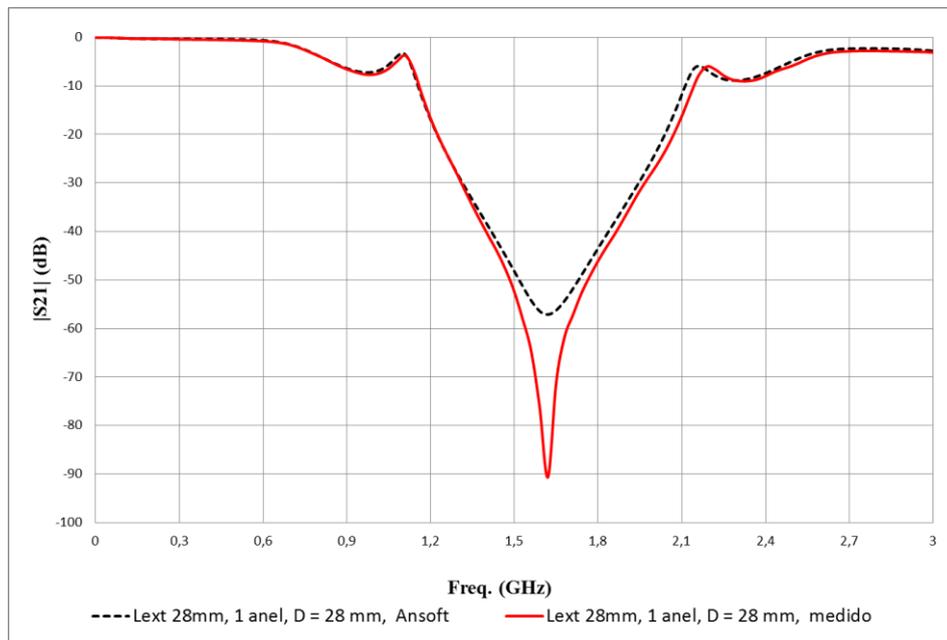


Figura 4-12 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com um anel, Lext de 28 mm e distância de 28 mm.

Tabela 4-5 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com um anel, Lext de 28mm e distância de 28mm.

	Lext = 28 mm D = 28 mm
f_{r1} (GHz)	1,621
Região de transição (GHz)	0,540
BW (GHz)	1,940

Portanto, dos resultados apresentados verifica-se que existe uma distância mínima para a qual o filtro apresenta um maior desacoplamento entre as seções.

De maneira análoga à estrutura com um anel, foram realizadas simulações com estruturas com dois anéis em cascata. A Figura 4-13 apresenta as respostas

em frequência obtidos na caracterização numérica para os filtros com dois anéis em cascata com L1ext 28 mm/20mm, na faixa de frequência até 1,5 GHz, variando a distância entre os ressonadores de 3 mm até 30 mm.

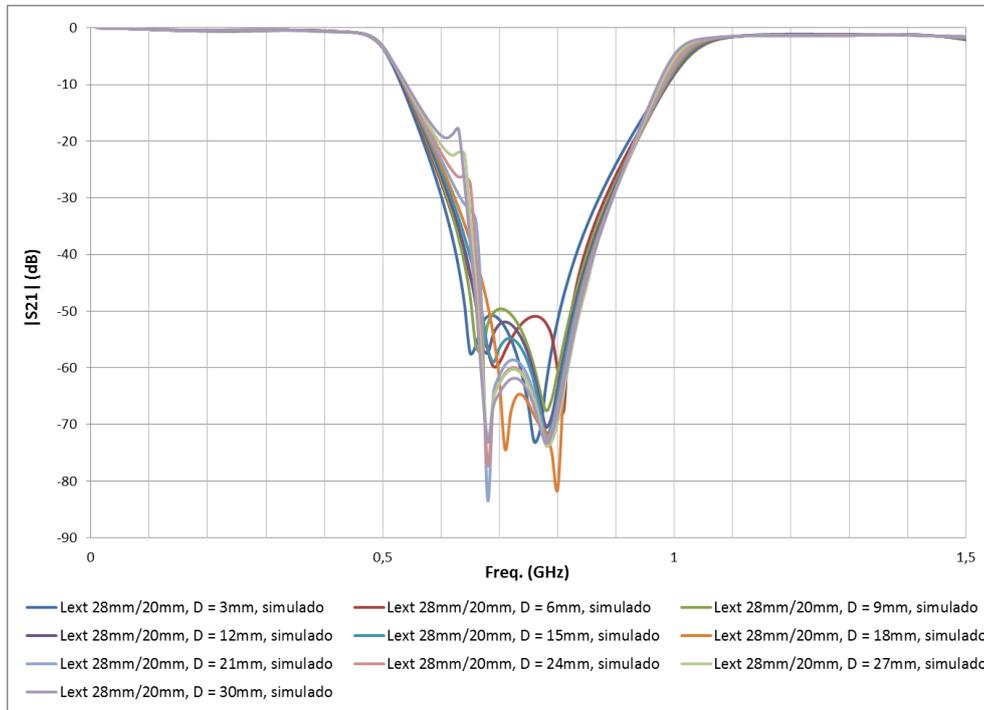


Figura 4-13 — $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonadores em cascata com dois anéis em cascata, Lext de 28 mm/20mm, variando a distância de 3 mm até 30mm.

Novamente foram selecionados três ressonadores, agora com dois anéis, Lext 28mm/20mm, e em cascata com distância de 3mm, 14mm e 28mm.

Como referência, seja considerado um ressonador de uma seção, com dois anéis matrioska, sendo Lext 28mm/20mm, conforme a Figura. 4-14, na faixa de frequência até 1,5 GHz. Na Figura 4-15 são apresentados os resultados medidos e experimentais, verificando-se novamente uma concordância muito boa entre os mesmos. Observa-se a presença de duas frequências de ressonâncias como era esperado, f_{r1} 0,701GHz e f_{r2} 0,781 GHz, com uma região de transição de 0,140 GHz e uma banda de rejeição de 0,320 GHz. Na Tabela 4-6 são descritas as características resumidas dos resultados simulados.

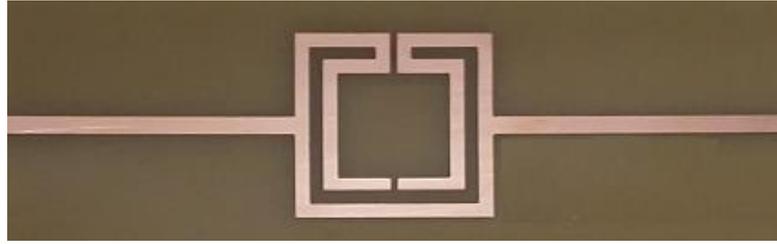


Figura 4-14 – Ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28 mm/20 mm.

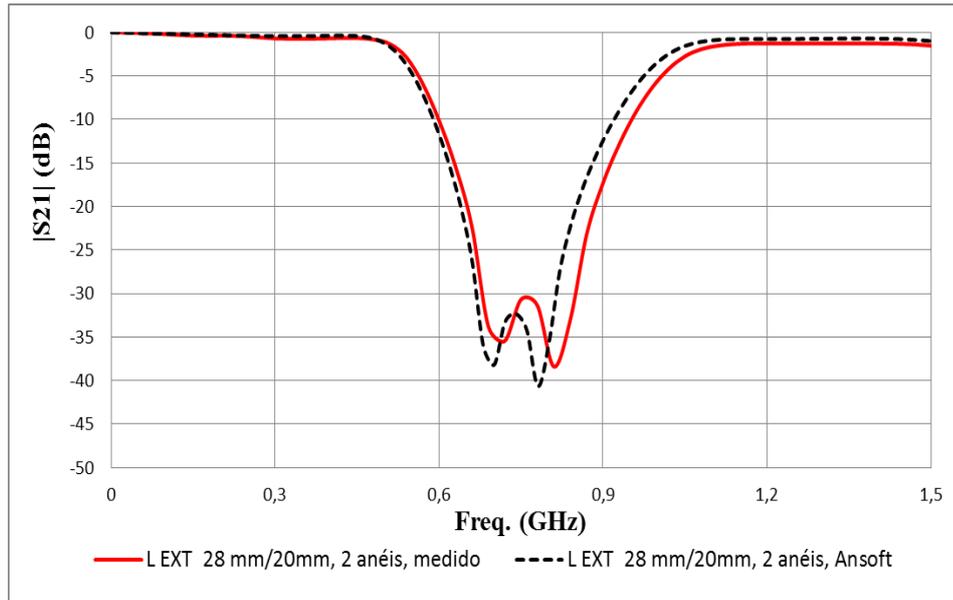


Figura 4-15 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28 mm/20mm.

Tabela 4-6 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28mm/20mm.

	Lext 28mm/20mm
f_{r1} (GHz)	0,701
f_{r2} (GHz)	0,781
Região de transição (GHz)	0,140
BW (GHz)	0,320

Seja considerado um filtro com dois anéis em cascata, sendo Lext 28mm/20mm, distância entre as seções de 3 mm, conforme a Figura. 4-16, na faixa de frequência até 1,5 GHz, resposta em frequência apresentada na Figura 4-17, com f_{r1} 0,661 GHz e f_{r2} 0,821 GHz. Na Tabela 4-7 são descritos as características resumidas dos resultados simulados. Note que, comparado com o filtro com um único anel, obteve-se um aumento de aproximadamente 10 dB na mínima

atenuação, saindo de 32 dB para 42 dB, com uma redução da região de transição e aumento da banda de rejeição.

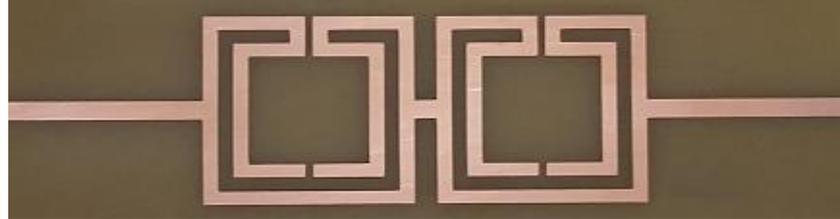


Figura 4-16 – Ressonador em cascata com dois anéis, L_{EXT} de 28 mm/20mm e distância de 3 mm.

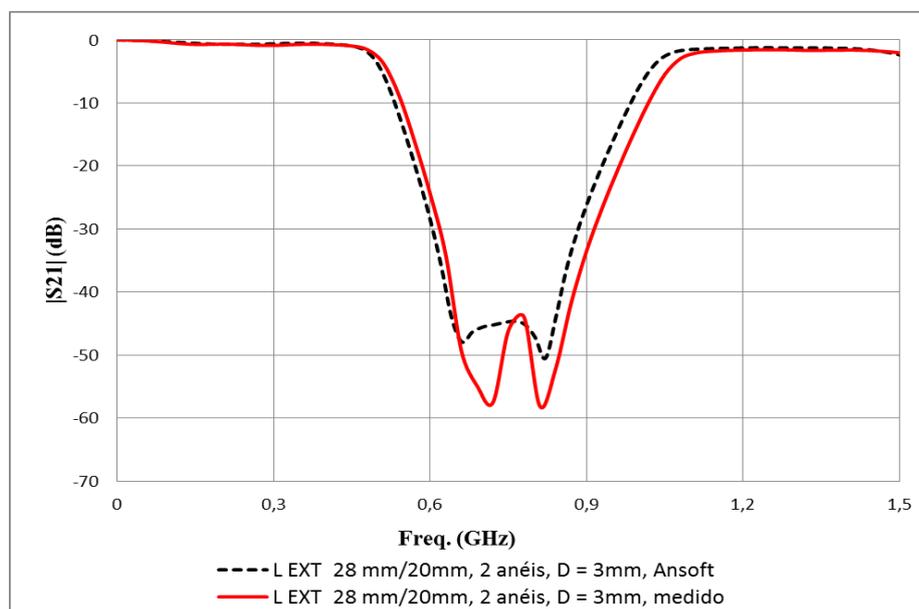


Figura 4-17 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com dois anéis, L_{EXT} de 28 mm/20mm e distância de 3 mm.

Tabela 4-7 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com dois anéis, L_{EXT} de 28mm/20 mm e distância de 3 mm.

	L_{EXT} 28 mm/20 mm D = 3 mm
f_{r1} (GHz)	0,661
f_{r2} (GHz)	0,821
Região de transição (GHz)	0,120
BW (GHz)	0,440

Na Figura 4-18 é apresentado um filtro com duas seções, com ressonadores com dois anéis em cascata, sendo L_{EXT} 28mm/20mm, e distancia entre os ressonadores de 14 mm. Para essa estrutura a resposta em frequência é apresentada na Figura 4-19, na faixa de frequência até 1,5 GHz, observando-se uma

concordância muito boa entre os resultados medido e simulado, com f_{r1} 0,681 GHz e f_{r2} 0,781 GHz, Figura 4-19. Na Tabela 4-8 são descritas as características resumidas dos resultados simulados. Comparando com o filtro com um único anel, obteve-se um aumento de aproximadamente 16 dB na mínima atenuação, saindo de 32 dB para 48 dB. Comparando com o filtro com duas seções, distância entre as seções de 3 mm, nota-se que aumentou a atenuação mínima, mas praticamente manteve-se as demais características de região de transição e banda de rejeição.

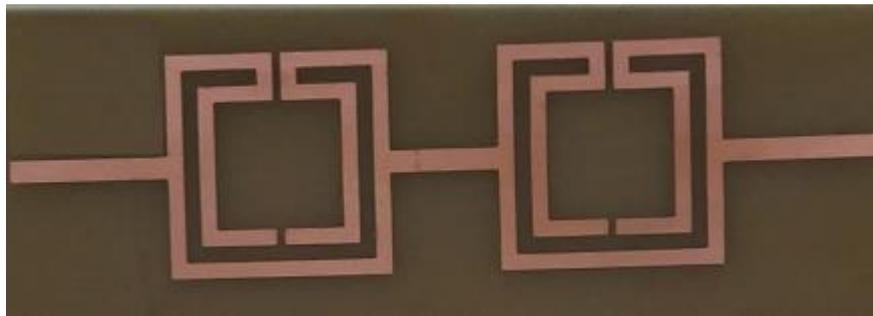


Figura 4-18 — Ressonador em cascata com dois anéis, L_{EXT} de 28 mm/20 mm e distância de 14 mm.

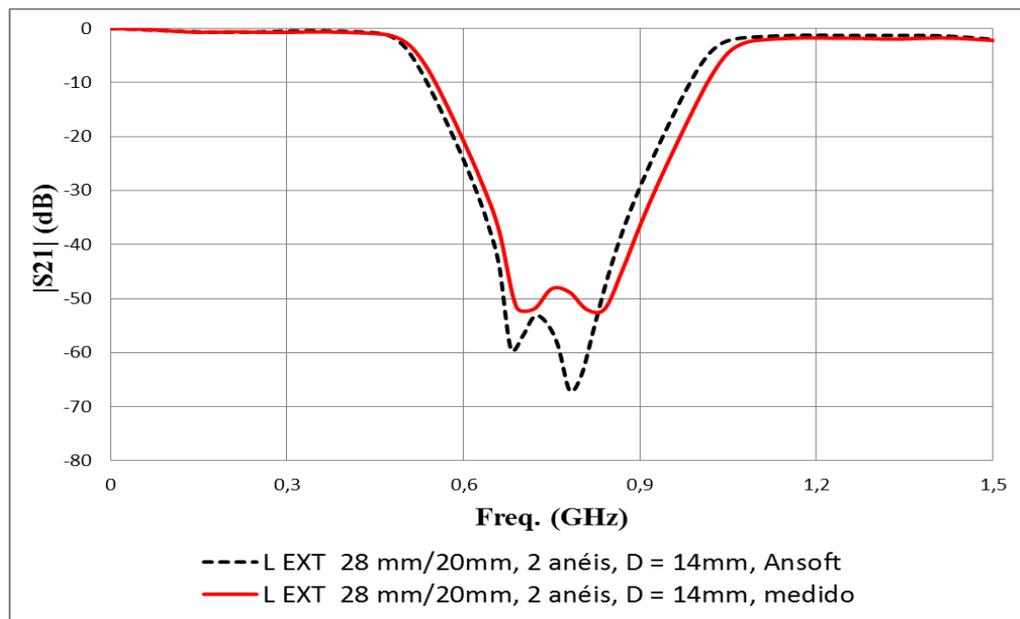


Figura 4-19 — $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com dois anéis, L_{EXT} de 28 mm/20mm e distância de 14 mm.

Tabela 4-8 — Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28mm/20 mm e distância de 14 mm.

	Lext 28mm/20mm D = 14 mm
f_{r1} (GHz)	0,681
f_{r2} (GHz)	0,781
Região de transição (GHz)	0,120
BW (GHz)	0,440

Seja considerado um filtro com ressonadores com dois anéis em cascata, sendo Lext 28mm/20mm, distancia entre os ressonadores de 28 mm, conforme a Figura. 4-20, na faixa de frequência até 1,5 GHz. Observa-se uma boa concordância entre os resultados medido e simulado, com f_{r1} 0,681 GHz e f_{r2} 0,781 GHz, Figura 4-21. Na Tabela 4-9 são descritos as características resumidas dos resultados simulados. Verifica-se que comprado com os filtros com distância de 3 mm e 14 mm, praticamente não ocorreu variação nas frequência de ressonância, na região de transição e na banda de rejeição, porém uma atenuação mínima de aproximadamente 62 dB, aproximadamente 30 dB a mais que o filtro com um único anel.

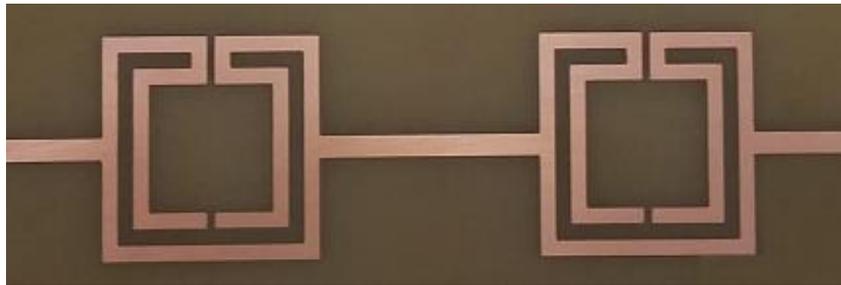


Figura 4-20 — Ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28 mm/20 mm e distância de 28 mm.

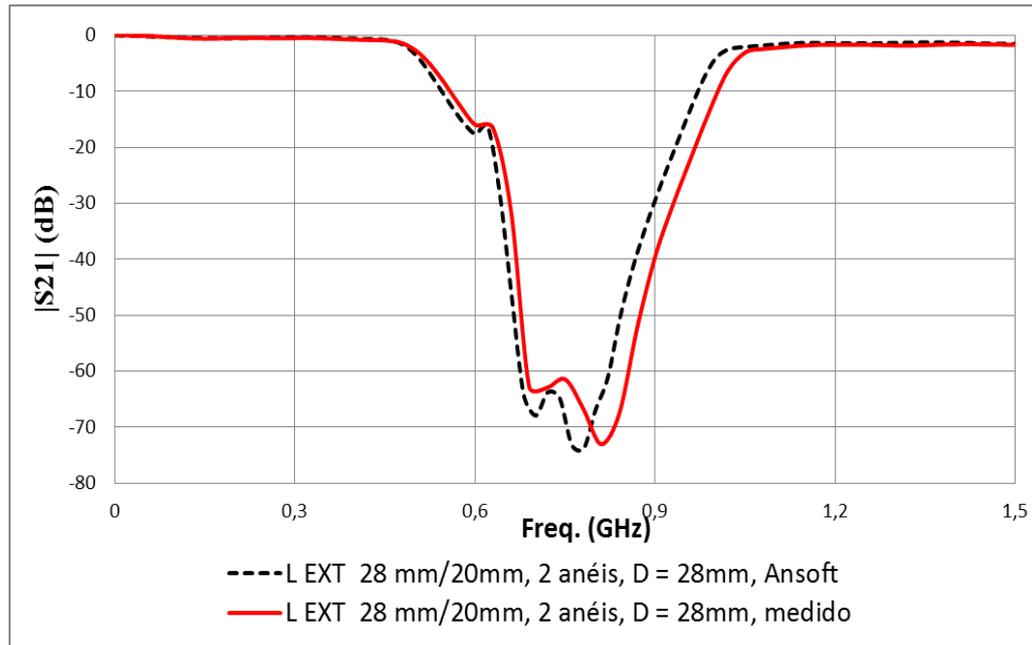


Figura 4-21 — $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28 mm/20mm e distância de 28 mm.

Tabela 4-9 — Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com dois anéis, Lext de 28mm/20 mm e distância de 28 mm.

	Lext 28mm/20mm D = 28 mm
f_{r1} (GHz)	0,681
f_{r2} (GHz)	0,781
Região de transição (GHz)	0,160
BW (GHz)	0,400

Dando continuidade às investigações, foram realizadas simulações com estruturas de duas seções em cascata, cada uma com três anéis. A Figura 4-22 apresenta as respostas em frequência obtidas na caracterização numérica para seções com três anéis com Lext 28 mm/20mm/12mm, na faixa de frequência até 1,5 GHz, variando a distância entre os ressonadores de 3 mm até 30 mm.

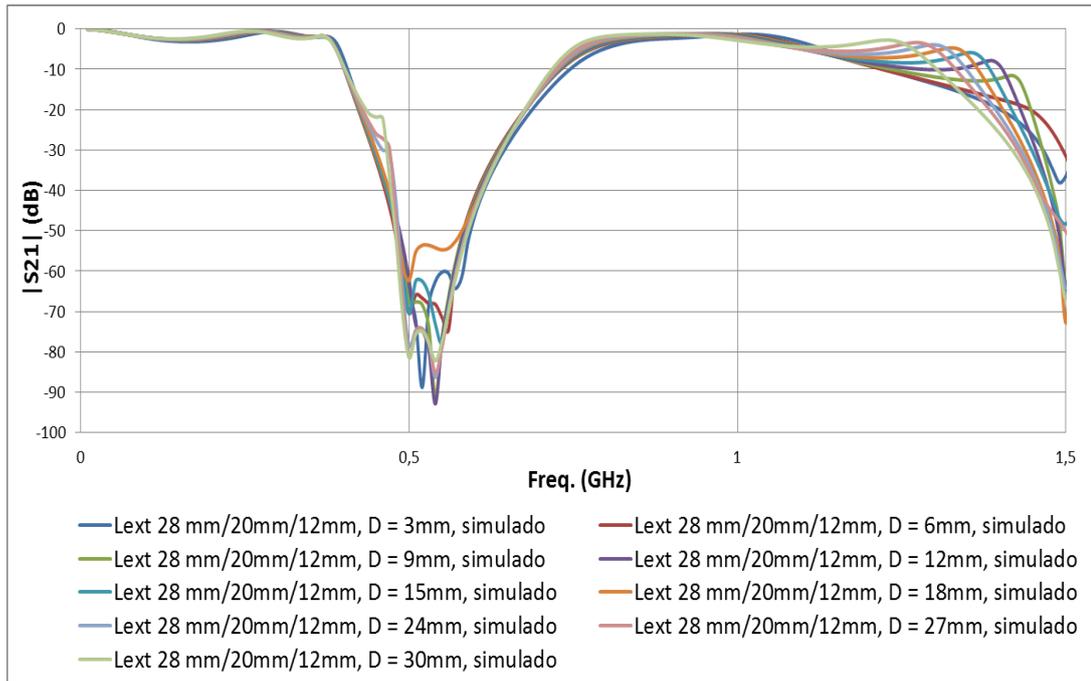


Figura 4-22 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonadores em cascata com três anéis, Lext de 28 mm/20mm/12mm, variando a distância de 3 mm até 30mm.

De maneira semelhante às estruturas com um e dois anéis, seja considerada como referência um ressonador com apenas uma seção de três anéis, Figura. 4-23, cuja resposta em frequência até 1,5 GHz é apresentada na Figura 4-24, observando-se uma concordância muito boa entre resultados medidos e numéricos, com f_{r1} 0,541GHz e f_{r2} 0,621 GHz. Na Tabela 4-10 são descritas as características resumidas dos resultados simulados.

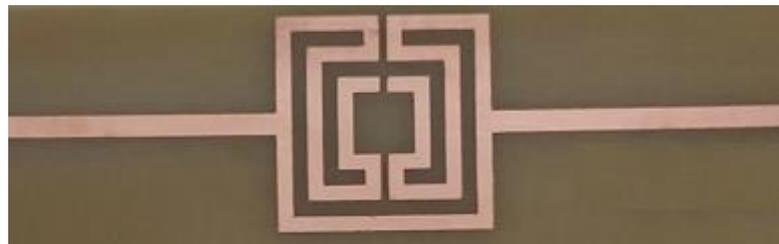


Figura 4-23 – Ressonador em cascata com três anéis Lext 28mm/20mm/12mm.

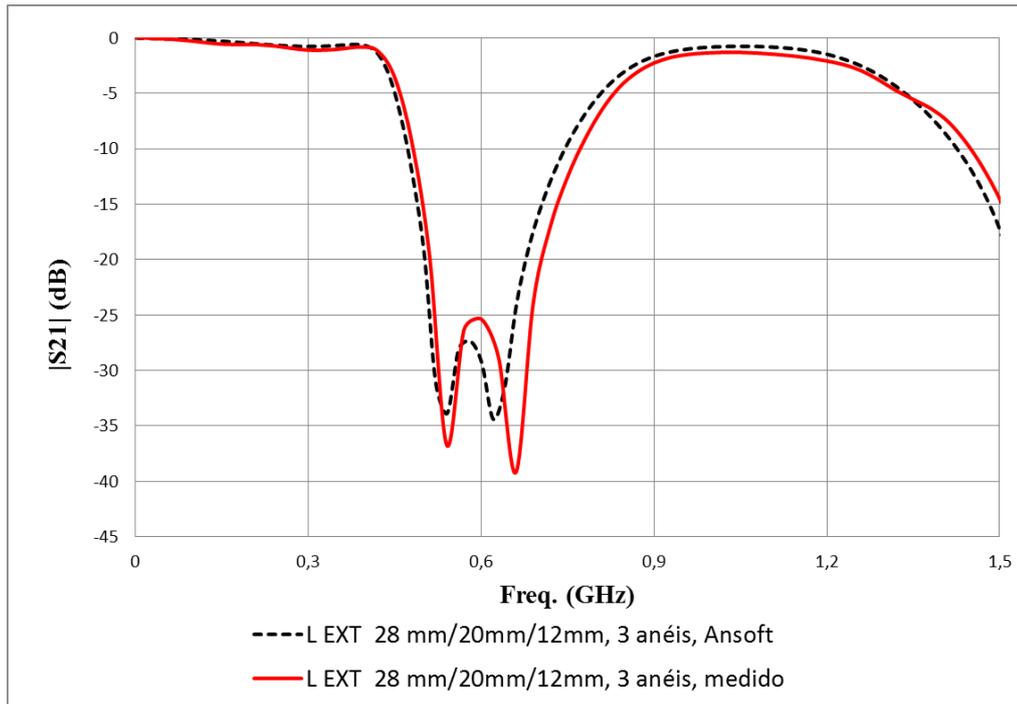


Figura 4-24 — $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L_{ext} de 28 mm/20mm/12mm.

Tabela 4-10 — Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L_{ext} de 28mm/20 mm/12mm.

	L_{ext} 28mm/20mm/12mm
f_{r1} (GHz)	0,541
f_{r2} (GHz)	0,621
Região de transição (GHz)	0,080
BW (GHz)	0,260

Considerando os ressonadores com três anéis em cascata, sendo L_{ext} 28mm/20mm/12mm, distância entre os ressonadores de 3 mm, conforme a Figura. 4-25, na faixa de frequência até 1,5 GHz. Observa-se boa concordância entre os resultados medido e simulado, com f_{r1} 0,541 GHz e f_{r2} 0,621 GHz, Figura 4-26. Na Tabela 4-11 são descritos as características resumidas dos resultados simulados. Entretanto, a banda de rejeição tem a atenuação mínima comprometida, ficando em torno de 32 dB, ainda assim, maior do que a atenuação mínima para apenas uma seção, que é em torno de 25 dB.

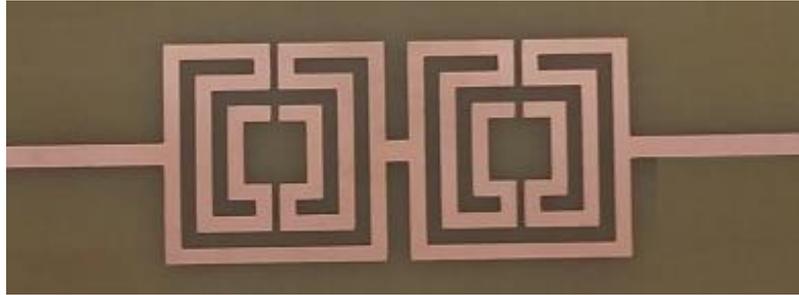


Figura 4-25 – Ressonador em cascata com três anéis Lext 28mm/20mm/12mm e distância de 3 mm.

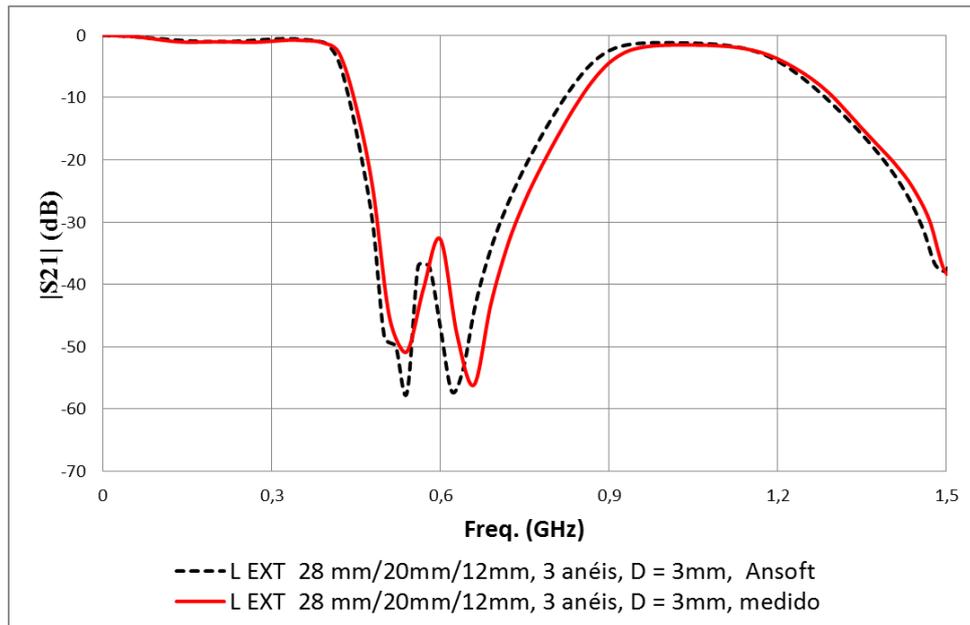


Figura 4-26 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28 mm/20mm/12mm e distância de 3 mm.

Tabela 4-11 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28mm/20 mm/12mm e distância de 3 mm.

	Lext 28 mm/ 20 mm/12 mm D = 3mm
f_{r1} (GHz)	0,541
f_{r2} (GHz)	0,621
Região de transição (GHz)	0,060
BW (GHz)	0,380

Seja considerado os ressonadores com três anéis em cascata, sendo Lext 28mm/20mm/12mm, distância entre os ressonadores de 14 mm, conforme a Figura. 4-27. A resposta em frequência é apresentada na Figura 4-28, observando-se uma boa concordância entre os resultados medidos e os simulados, exceto na faixa de frequência em torno da segunda ressonância, 0,701 GHz, onde o resultado simulado

não acompanha o resultado medido. Essa diferença entre os resultados numérico e medido dificultam uma análise da resposta em frequência. Na Tabela 4-12 são descritos as características resumidas dos resultados simulados.

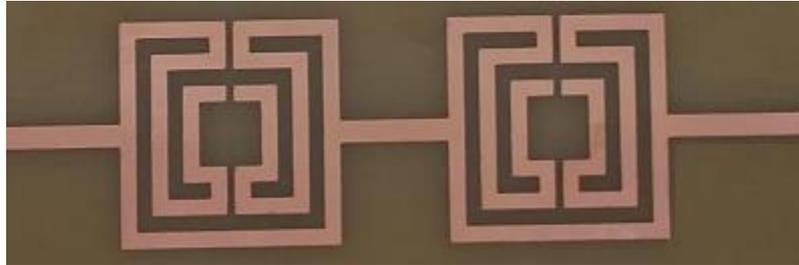


Figura 4-27 – Ressonador em cascata com três anéis Lext 28mm/20mm/12mm e distância de 14 mm.

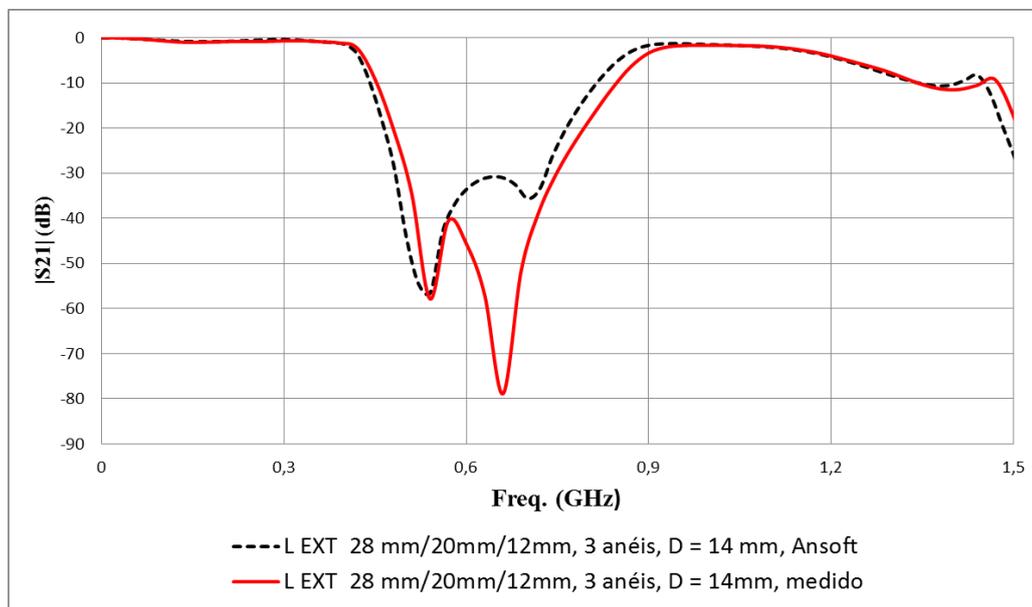


Figura 4-28 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28 mm/20mm/12mm e distância de 14 mm.

Tabela 4-12 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28mm/20 mm/12mm e distância de 14 mm.

	Lext 28mm/20mm/12mm D = 14mm
f_{r1} (GHz)	0,541
f_{r2} (GHz)	0,701
Região de transição (GHz)	0,060
BW (GHz)	0,360

Considerando os ressonadores com três anéis em cascata, sendo L_{ext} 28mm/20mm/12mm, distancia entre os ressonadores de 28 mm, conforme a Figura. 4-29, na faixa de frequência até 1,5 GHz, observa-se boa concordância entre os resultados medido e simulado, com f_{r1} 0,541 GHz e f_{r2} 0,641 GHz, Figura 4-30. Na Tabela 4-13 são descritas as características resumidas dos resultados simulados. Observa-se que foi obtida, além das características de região de transição e largura de banda, uma atenuação mínima na banda de rejeição de aproximadamente 50 dB, o que é uma resultado bastante interessante.

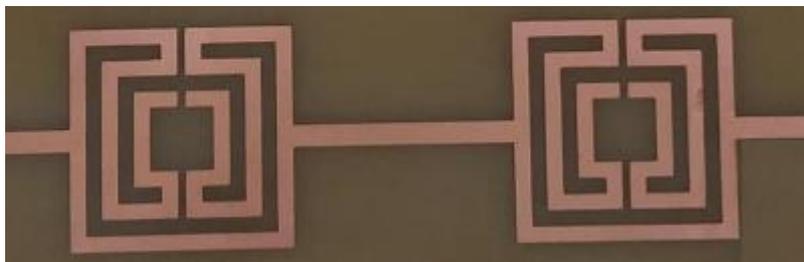


Figura 4-29 — Ressonador em cascata com três anéis L_{ext} 28mm/20mm/12mm e distância de 28 mm.

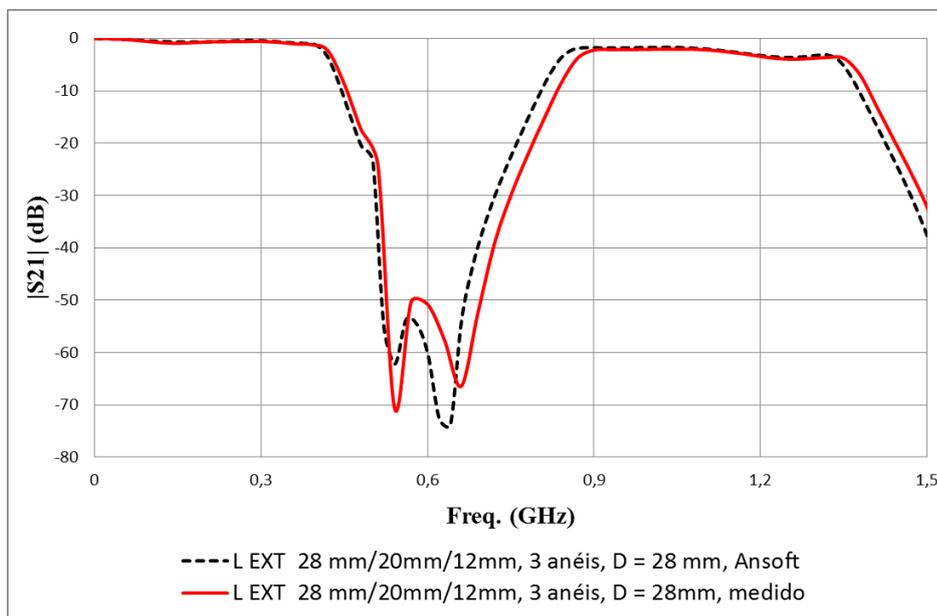


Figura 4-30 — $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L_{ext} de 28 mm/20mm/12mm e distância de 28 mm.

Tabela 4-13 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, Lext de 28mm/20 mm/12mm e distância de 28 mm.

	Lext 28mm/20mm/12mm D = 28mm
f_{r1} (GHz)	0,541
f_{r2} (GHz)	0,641
Região de transição (GHz)	0,080
BW (GHz)	0,340

4.2 Estruturas em cascata com geometrias diferentes

Com o objetivo de realizar um ajuste mais flexível da largura de banda, nesta seção é investigada a utilização de geometrias diferentes em cascata. Foram selecionados ressonadores com três anéis, com Lext 28mm/20mm/12mm e Lext 28mm/19mm/8mm e distância de 3mm, 14mm e 28mm entre os ressonadores.

Como uma primeira etapa foi caracterizado o ressonador com três anéis matrioska, sendo Lext 28mm/19mm/8mm, Figura. 4-31, sendo a resposta em frequência apresentada na Figura 4-32, com f_{r1} 0,561GHz e f_{r2} 0,681 GHz. Na Tabela 4-14 são descritas as características resumidas dos resultados simulados.

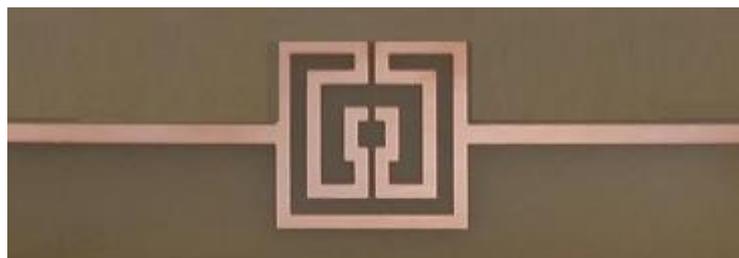


Figura 4-31 – Ressonador em cascata com três anéis Lext 28mm/19mm/8mm.

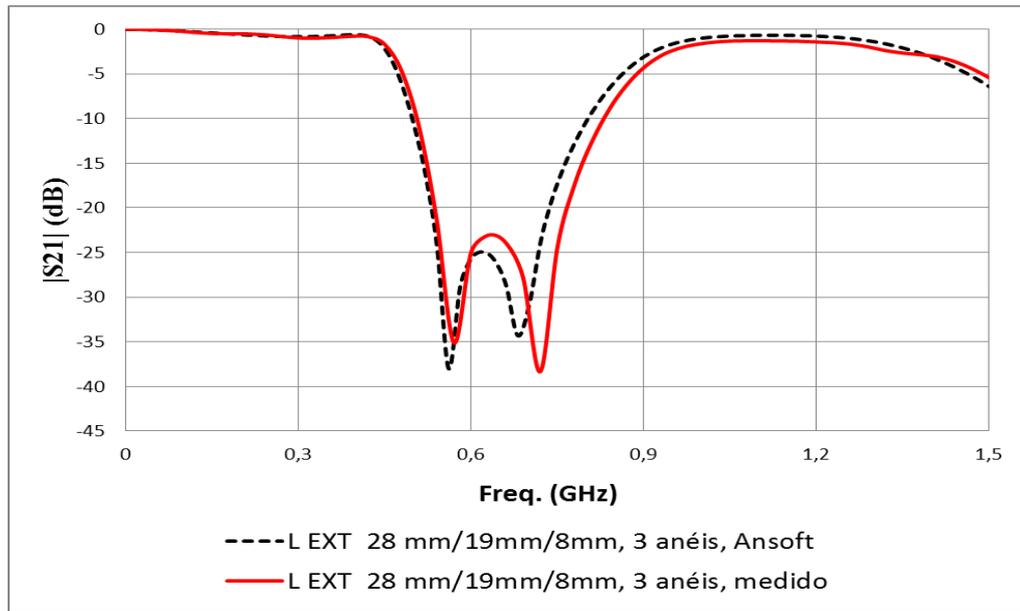


Figura 4-32 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L_{ext} de 28 mm/19mm/8mm.

Tabela 4-14 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L_{ext} de 28mm/19 mm/8mm.

	L_{ext} 28mm/19mm/8mm
f_{r1} (GHz)	0,561
f_{r2} (GHz)	0,681
Região de transição (GHz)	0,100
BW (GHz)	0,300

Considerando a estrutura com geometrias diferentes, com três anéis em cascata, sendo L_{ext} 28mm/20mm/12mm, L_{ext} 28mm/19mm/8mm e distância entre os ressonadores de 3 mm, Figura. 4-33. A resposta em frequência é apresentada na Figura 4-34, com f_{r1} 0,561 GHz e f_{r2} 0,641 GHz, observando-se uma boa concordância entre os resultados numérico e experimental. Na Tabela 4-15 são descritas as características resumidas dos resultados simulados. Comparado com o filtro com uma seção, observa-se um aumento da largura de banda de 0,300 GHz para 0,380 GHz, ou seja, um aumento de aproximadamente 26,7%. Além disso, a atenuação mínima na banda passante passou de 23 dB para 32 dB.

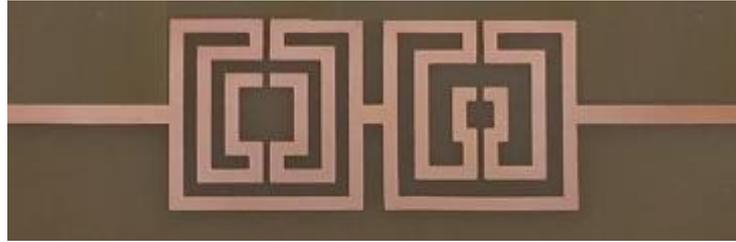


Figura 4-33 – Ressonador em cascata com três anéis L1ext 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 3 mm.

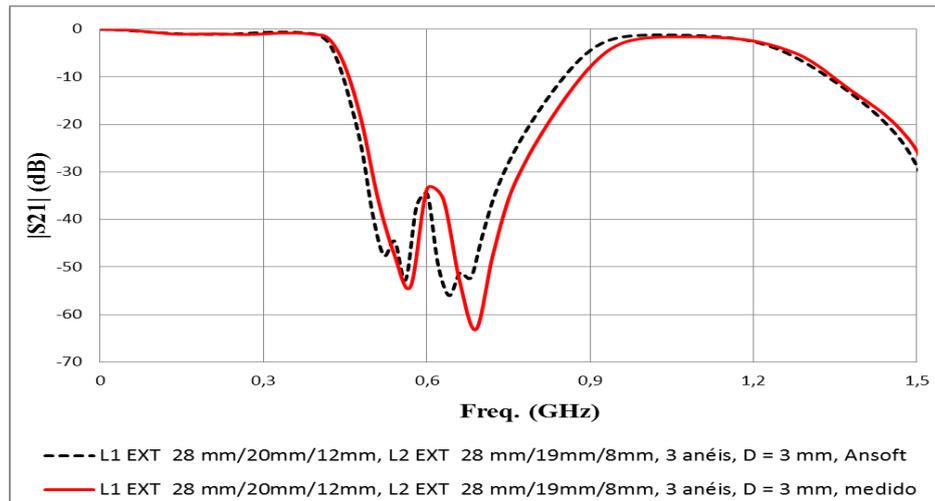


Figura 4-34 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 3 mm.

Tabela 4-15 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 3 mm.

	L1ext 28mm/20mm/12mm L1ext 28mm/19mm/8mm D = 3mm
f_{r1} (GHz)	0,561
f_{r2} (GHz)	0,641
Região de transição (GHz)	0,080
BW (GHz)	0,380

Seja considerada uma estrutura com geometria diferentes em cascata, sendo Lext 28mm/20mm/12mm, Lext 28mm/19mm/8mm e distância entre os ressonadores de 14 mm, Figura. 4-35. Observa-se boa concordância entre os resultados medido e simulado, com f_{r1} 0,541 GHz e f_{r2} 0,641 GHz, Figura 4-36. Na Tabela 4-16 são descritas as características resumidas dos resultados simulados. Comparando com a estrutura com uma distância de 3mm, praticamente verifica-se a mesma largura da banda de rejeição.

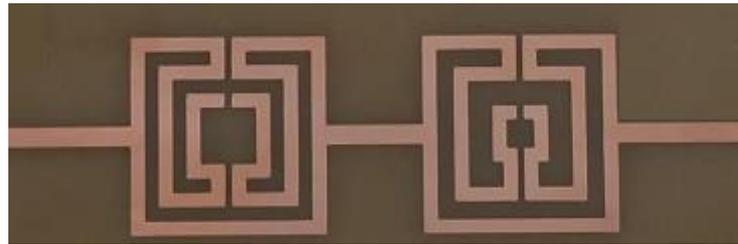


Figura 4-35 — Ressonador em cascata com três anéis L1ext 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 14 mm.

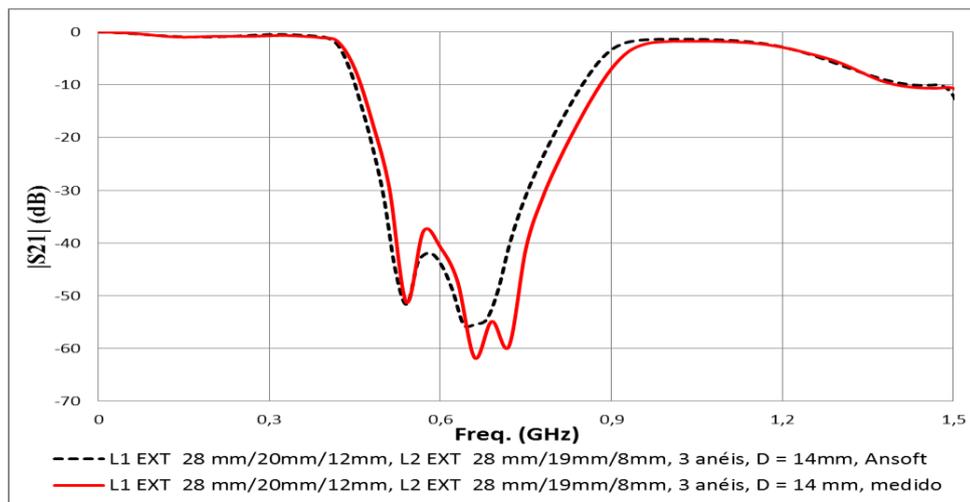


Figura 4-36 — $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28 mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 14 mm.

Tabela 4-16 — Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 14 mm.

	L1ext 28mm/20mm/12mm L1ext 28mm/19mm/8mm D = 14mm
f_{r1} (GHz)	0,541
f_{r2} (GHz)	0,641
Região de transição (GHz)	0,060
BW (GHz)	0,380

Considerando agora uma estrutura com três anéis em cascata, sendo Lext 28mm/20mm/12mm, Lext 28mm/19mm/8mm e distância entre os ressonadores de 28 mm, Figura. 4-37. Na Figura 4-38 são apresentados os resultados medido e simulado, com f_{r1} 0,561 GHz e f_{r2} 0,681 GHz, Figura 4-38, observando-se uma boa concordância entre os resultados. Na Tabela 4-17 são descritos as características resumidas dos resultados simulados. Observa-se praticamente a mesma largura de

banda que a verificada para as distâncias de 3 mm e 14 mm, 0,360 GHz, porém com uma atenuação mínima na largura de banda de quase 50 dB.

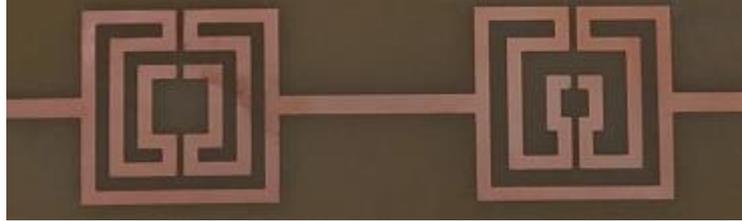


Figura 4-37 – Ressonador em cascata com três anéis L1ext 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 28 mm.

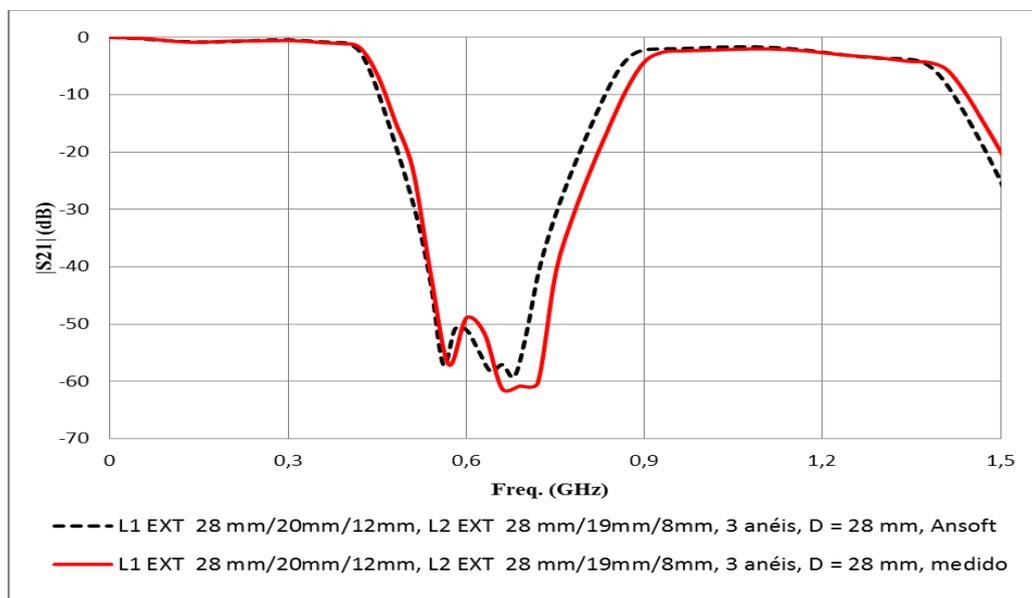


Figura 4-38 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28 mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 28 mm.

Tabela 4-17 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/19mm/8mm e distância de 28 mm.

	L1ext 28mm/20mm/12mm L1ext 28mm/19mm/8mm D = 28mm
f_{r1} (GHz)	0,561
f_{r2} (GHz)	0,681
Região de transição (GHz)	0,080
BW (GHz)	0,360

Uma segunda estrutura em cascata foi considerada, sendo Lext 28mm/20mm/12mm, 28mm/17mm/8mm e distância de 3mm, 14mm e 28mm entre os ressonadores.

Inicialmente foi considerado um ressonador com uma única seção, com três anéis matrioska, sendo L_{ext} 28mm/17mm/8mm, Figura. 4-39. Na Figura 4-40 é apresentada a resposta em frequência, com f_{r1} 0,581 GHz e f_{r2} 0,721 GHz, observando-se uma boa concordância entre resultados medido e numérico. Na Tabela 4-18 são descritos as características resumidas dos resultados simulados.

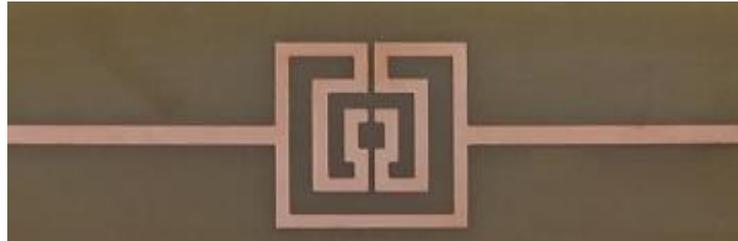


Figura 4-39 – Ressonador em cascata com três anéis L1ext 28mm/17mm/8mm.

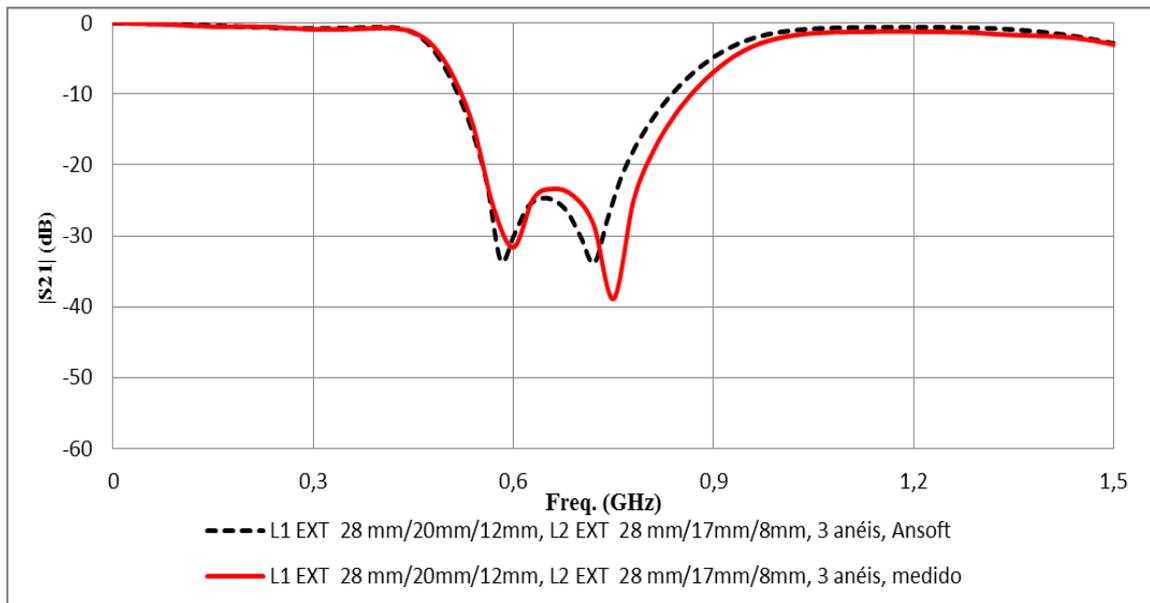


Figura 4-40 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28 mm/17mm/8mm.

Tabela 4-18 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/17mm/8mm.

	L1ext 28mm/17mm/8mm
f_{r1} (GHz)	0,581
f_{r2} (GHz)	0,721
Região de transição (GHz)	0,100
BW (GHz)	0,300

Seja considerada uma estrutura com geometrias diferentes com três anéis em cascata, sendo L_{ext} 28mm/20mm/12mm, L_{ext} 28mm/17mm/8mm e distância entre os ressonadores de 3 mm, Figura. 4-41, na faixa de frequência até 1,5 GHz. Observa-se boa concordância entre os resultados medido e simulado, com f_{r1} 0,521 GHz e f_{r2} 0,721 GHz, Figura 4-42. Na Tabela 4-19 são descritos as características resumidas dos resultados simulados. Quando comparada ao filtro com uma seção, observa-se um aumento de aproximadamente 33% na largura de banda, de 0,300 GHz para 0,400 GHz.

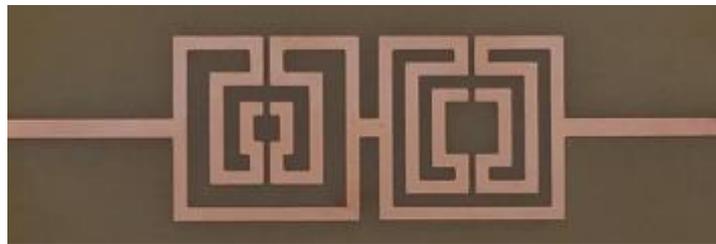


Figura 4-41 – Ressonador em cascata com três anéis, L_{1ext} 28mm/20mm/12mm, L_{1ext} 28mm/17mm/8mm e distancia de 3 mm.

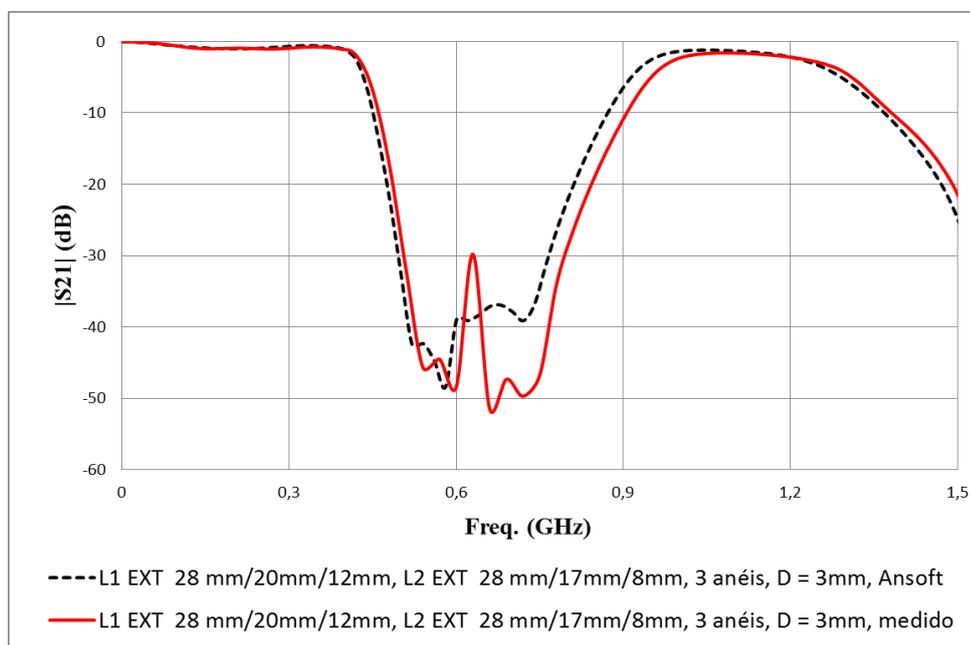


Figura 4-42 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L_{1ext} de 28 mm/20mm/12mm, L_{1ext} 28mm/17mm/8mm e distância de 3 mm.

Tabela 4-19 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 3 mm.

	L1ext 28mm/20mm/12mm L1ext 28mm/17mm/8mm D = 3mm
f_{r1} (GHz)	0,521
f_{r2} (GHz)	0,721
Região de transição (GHz)	0,060
BW (GHz)	0,400

Considere-se uma estrutura com duas seções com três anéis em cascata, sendo Lext 28mm/20mm/12mm, Lext 28mm/17mm/8mm e distância entre os ressonadores de 14 mm, Figura. 4-43. A resposta em frequência é apresentada na Figura 4-44, com f_{r1} 0,521 GHz e f_{r2} 0,721 GHz. Na Tabela 4-20 são descritas as características resumidas dos resultados simulados. Comparando as larguras de banda, verifica-se que não existe uma diferença muito grande entre os resultados para 3mm e 14 mm.

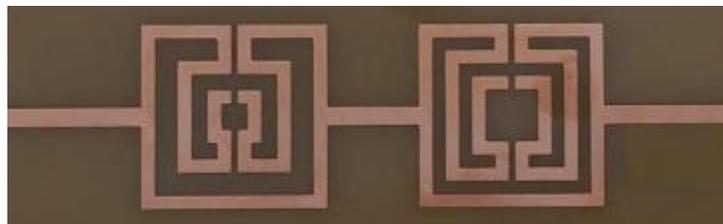


Figura 4-43 – Ressonador em cascata com três anéis, L1ext 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distancia de 14 mm.

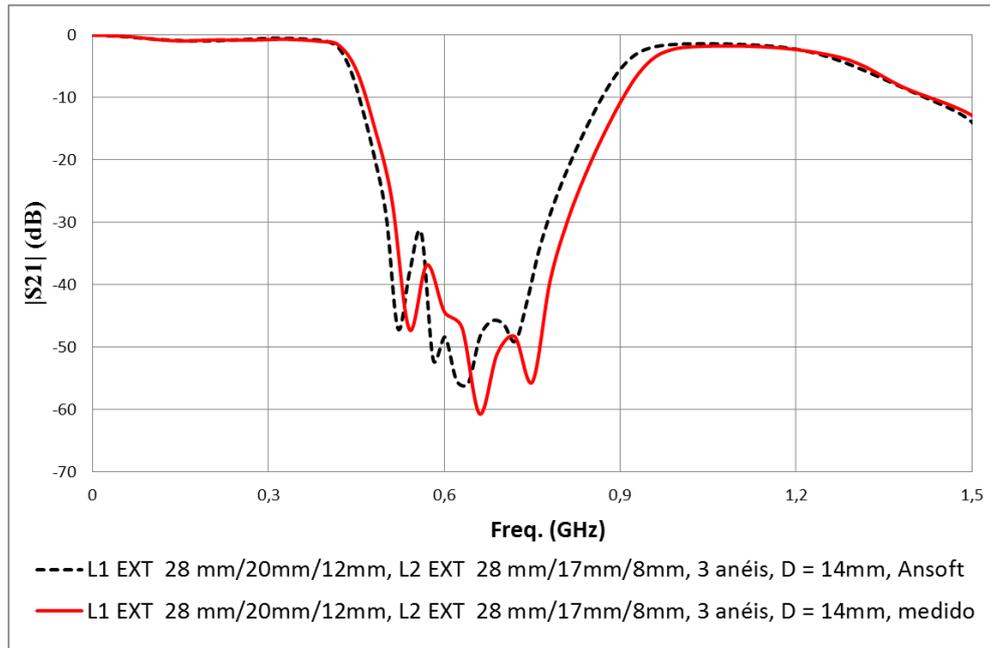


Figura 4-44 — $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28 mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 14 mm.

Tabela 4-20 — Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 14 mm.

	L1ext 28mm/20mm/12mm L1ext 28mm/17mm/8mm D = 14mm
f_{r1} (GHz)	0,521
f_{r2} (GHz)	0,721
Região de transição (GHz)	0,060
BW (GHz)	0,400

Seja considerada uma estrutura de duas seções de três anéis, sendo Lext 28mm/20mm/12mm, Lext 28mm/17mm/8mm e distância entre os ressonadores de 28 mm, Figura. 4-45. A resposta em frequência é apresentada na Figura 4-46, com f_{r1} 0,561 GHz e f_{r2} 0,661 GHz, f_{r3} 0,701 GHz. Uma concordância muito boa é observada entre os resultados medido e experimental. Na Tabela 4-21 são descritas as características resumidas dos resultados simulados.

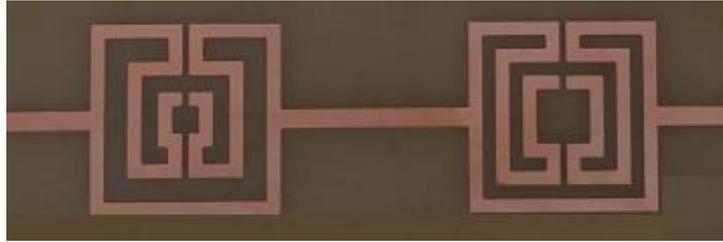


Figura 4-45 – Ressonador em cascata com três anéis, L1ext 28mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 28 mm.

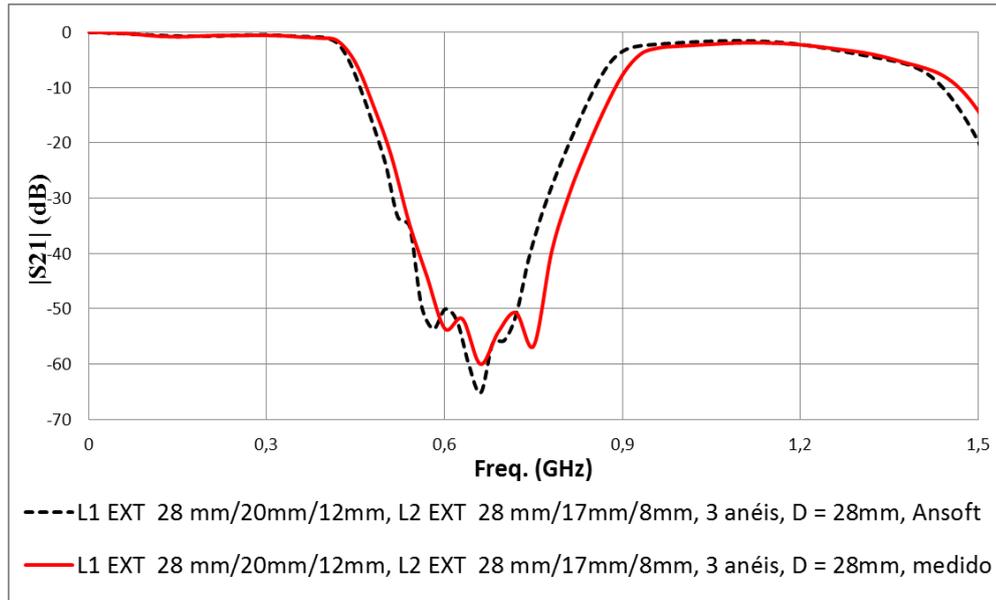


Figura 4-46 – $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz) para ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28 mm/20mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 28 mm.

Tabela 4-21 – Características observadas para a resposta em frequência do ressonador em cascata com três anéis, L1ext de 28mm/20 mm/12mm, L1ext 28mm/17mm/8mm e distância de 28 mm.

	L1ext 28mm/20mm/12mm L1ext 28mm/17mm/8mm D = 28mm
f_{r1} (GHz)	0,561
f_{r2} (GHz)	0,661
f_{r3} (GHz)	0,701
Região de transição (GHz)	0,080
BW (GHz)	0,380

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações finais

Esta dissertação teve por objetivo apresentar a caracterização de filtros baseados na geometria matrioska, tendo sido estudados ressonadores com um, dois e três anéis.

Durante a dissertação foram analisados os filtros com a geometria matrioska com uma e duas seções, considerando resultados numéricos, obtidos com a utilização do software ANSYS designer 8.0, e experimentais, obtidos utilizando o analisador de redes Agilent E5071C, do Laboratório de Micro-ondas do GTEMA/IFPB.

Inicialmente foram analisados filtros de uma seção, com um anel, dois e três anéis. Observando uma concordância muito boa entre os resultados numéricos e experimentais.

Analisando os filtros com a geometria matrioska com um anel obteve-se uma redução da frequência de ressonância com o aumento do comprimento efetivo do filtro. Com a dimensão fixa do anel externo da geometria com dois anéis e variando o anel interno, observa-se uma redução da frequência ressonância de aproximadamente de 57%, comparando com a geometria com um anel, destacando ainda a diminuição da região de transição. Comparando a geometria com dois anéis, observa-se a diminuição da frequência de ressonância e a região de transição com o aumento do anel interno. Já na geometria com três anéis foi possível reduzir a frequência de ressonância de até 66%, quando comparados estruturas de um anel com mesma área, descartando uma considerável diminuição da região de transição.

De maneira geral, na comparação entre os filtros com uma seção, observando-se a redução da frequência de corte na medida em que o número de anéis aumenta, principalmente enquanto não existe um forte acoplamento entre os anéis. Analisando os resultados obtidos para cada tipo de ressonador, percebe-se que com o acréscimo de anéis, ocorreu uma redução significativa da frequência de ressonância e da região de transição.

Além disso, foram propostas equações iniciais de projeto para a primeira e a segunda frequência de ressonância para as geometrias com dois e três anéis baseadas na equação (1). Embora sejam equações aproximadas, com diferença

máxima de 6%, essas se mostraram bastante interessantes como um primeiro passo para uma otimização numérica.

Comparando os resultados numéricos e experimentais dos filtros com duas seções, observa-se uma boa concordância entre os resultados obtidos.

Com intuito de aumentar a atenuação da frequência de ressonância, foram analisados as estruturas com duas seções com mesma geometria, analisando os ressonadores com um, dois e três anéis, variando a distância entre os ressonadores de 3mm até 30mm. Foram comparados os filtros em cascata, variando a distância entre as seções de 3mm, 14mm e 28mm. Constatou-se que é possível obter valores elevados de atenuação mínima na região de transição (até 50 dB).

Com o objetivo de controlar de maneira mais flexível a largura de banda, foram considerados os resultados numéricos e experimentais para os filtros com duas seções, com estruturas em cascata com geometria diferente, tendo sido analisados estruturas em cascata com ressonadores de três anéis, variando a distância entre os ressonadores de 3mm até 30mm. Foram comparados os filtros em cascata, variando a distância entre as seções de 3mm, 14mm e 28mm. Obtendo assim, o aumento da banda de rejeição (até 33%).

Destaque-se que os valores apresentados nesta dissertação foram obtidos sem nenhuma otimização. Obtivemos bons resultados, onde foi possível fazer o depósito de uma patente.

5.2 Sugestões e trabalhos futuros

Como proposta para continuidade nesta dissertação, novas pesquisas podem ser desenvolvidas com base na utilização da geometria matrioska em filtros, podendo ser citada como por exemplo:

- Filtros assimétricos;
- Filtros reconfiguráveis;
- Análise das regiões de acoplamento entre os filtros;
- Otimização do cálculo da largura da fita;
- Implementação de filtros passa-faixa;
- Utilização de estruturas DGS para aumento da faixa de operação dos filtros;
- Otimização da região de acoplamento entre as seções em cascata.

TRABALHOS PUBLICADOS E DEPOSITO DE PATENTE

1. G. Neto et al, “Análise da aplicação da geometria matrioska aos filtros em microfita”, *Momag2016*, Porto Alegre, 2016.
2. Patente depositada: FILTRO PLANAR EM MICROFITA COM GEOMETRIA MATRIOSKA COM DOIS ANÉIS RESSONADORES. IFPB, João Pessoa, 2016.
3. J.G. Mariano et al, “análise e simulação de filtros de microfita utilizando a geometria matrioska. CONNEPI, Alagoas, 2016.
4. Thayuan R. de Sousa, Alfredo G. Neto, Josefa Gilliane de Oliveira M. Utilização da estrutura matrioska na caracterização numérica de filtros planares. XI Semana de Ciência e Tecnologia, Eixo gestão sustentável – círculo de cultura VII, IFPB, João Pessoa, 2016.
5. Thayuan R. de Sousa, Josefa Gilliane de Oliveira M., Alfredo G. Neto. Caracterização numérica de filtro planar com geometria matrioska. Reunião Regional da SBPC, Palhoça, SC, 2016.

REFERÊNCIAS

- [1] H. M. de Oliveira. **Engenharia de Telecomunicações**. 1ª Ed. Recife: HM, 673 p. il, 2012.
- [2] R. D. Gomes, M. S. Alencar, I. E. Fonseca e A. C. Lima Filho. “Desafios de redes de sensores sem fio industriais,” *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 4, pp. 1-12, 2014.
- [3] D. R. Minervino, **Desenvolvimento de Estruturas Integradas de Filtros e Antenas para Aplicações em Sistemas de Comunicações sem Fio**, Rio Grande do Norte: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dissertação de Mestrado, 2013.
- [4] K. S. Krishna, **Investigations on Some Planar Microwave Filters**, India: National Institute of Technology Rourkela, Masters dissertation, 2014.
- [5] P. A. Neto, “História das comunicações e das telecomunicações,” Disponível em:
<http://www2.ee.ufpe.br/codec/Historia%20das%20comunicaes%20e%20das%20telecomunicaesUPE.pdf>, consultado em: 28/03/2016.
- [6] Teleco, “Mobilidade: A grande tendência do futuro, Promon Business Technology Review”, Disponível em: http://www.teleco.com.br/promon/pbtr/Mobilidade_4Web.pdf, consultado em: 28/03/2016.
- [7] N. J. P. L. Ramos, **Caracterização de Antena Tipo Refletor de Canto Utilizando Superfícies Seletivas em Frequência**, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2016.
- [8] V. E. Boria, P. Soto, and S. Cogollos, “Distributed models for filter synthesis,” *IEEE Microwave Magazine*, pp. 87-100, October, 2011.
- [9] R. Gomez-García and X. Gong, “Recent trends on RF/Microwave tunable filter design,” *IEEE Microwave Magazine*, July-August, 2014.
- [10] T. C. Edwards and M. B. Steer, **Foundations of Interconnect and Microstrip Design**, Wiley, 3rd Edition, England, 2000.
- [11] J. S. Hong and M. J. Lancaster, **Microstrip Filters for RF/Microwave Applications**, John Wiley & Sons, New York, 2001.

- [12] H. Madan, "Design of microstrip bandpass filters," *STP 2007 Project Report, Giant Meterwave Radio Telescope*, National Centre for Radio Astrophysics, Tata Institute of Fundamental Research, 2007.
- [13] R. R. Mansour, "Filter technologies for wireless base stations," *IEEE Microwave Magazine*, March, pp. 68-74, 2004.
- [14] M. Sans, et al., "Design of planar wideband bandpass filters from specifications using a two-Step aggressive space mapping (ASM) optimization algorithm," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, December, pp. 3341-3350, 2014.
- [15] R. Gomez-Garcia, and A. C. Guyette, "Reconfigurable multi-Band microwave filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, pp. 1294-1307, 2015.
- [16] A. G. Neto, et al., "Multiband frequency selective surface with open matryoshka elements," *9th European Conference on Antennas and Propagation*, v.1, Lisboa, 2015.
- [17] J. N. Cruz, **Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta**, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2015.
- [18] H. P. A. Ferreira, **Matrioska: Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas**, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [19] A. G. Neto, et al., "A proposed geometry for multi-Resonant frequency selective surfaces", In: *European Microwave Week 2014 Conference/44th European Microwave Conference (EuMC)*, European Microwave, Roma, 2014.
- [20] A. G. Neto at al, "Análise da aplicação da geometria matrioska aos filtros em microfita", *Momag2016*, Porto Alegre, 2016.
- [21] M. Hurber, "Boneca Matrioska," Disponível em: <http://mauriciohuber.blogspot.com.br/2011/08/matrioska.html>, consultado em 27/03/2016.
- [22] R. Gomez-Garcia et al., "Flexible filters," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, pp. 45–54. July 2014.
- [23] K. G. Avinash et al., "Design of bandpass filter using star loop dual mode resonator," *International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP), Melmaruvathur*, India, Apr. 2–5, 2015, pp. 238–241, 2015.

- [24] Jitha B, **Development of Compact Microwave Filters Using Microstrip Loop Resonators**, PhD. Thesis, Cochin University of Science and Technology, Cochin, 2010.
- [25] C. R. Alves, **Um Novo Filtro de Microondas com Dupla Banda Passante Utilizando Ressonadores Miniaturizados**, Brasília: Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 2007.
- [26] A. Boutejdar et al., “A new method to improve the rejectband of a 5.6 GHz bandstop filter using $\lambda/2$ open-loop ring microstrip resonators,” in *APMC 2008, Asia-Pacific Microwave Conference*, Hong Kong, Dec. 16–20, pp. 1–4, 2008.
- [27] P. Júnior, A et al., **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**, 8 ed. Porto Alegre, Bookman, 2015.
- [28] R. E. Collin, **Foundations for Microwave Engineering**, Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S. A, 1979.
- [29] J. Nascimento, **Telecomunicações**, São Paulo, Makron Books, 1991.
- [30] João Carlos Verneti dos Santos. **Introução á Teoria de Redes: Sintese de Filtros Passivos**. Canoas. Editora ULBRA, 2003.
- [31] K. Lacanette, **A Basic Introduction to Filters – Active, Passive and Switched-Capacitor**, *Application Note 779*, National Semiconductor, 22p, April, 1991.
- [32] Filtro passivo . Disponível em: https://www.google.com.br/search?q=filtro+passivo&espv=2&biw=1366&bih=653&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi69omvkuTOAhUFHZAKHZrwC4cQ_AUICCGD&dpr=1#imgrc=kXBqZd0zUAI3LM%3A. Acesso em: 27 de Agosto de 2016.
- [33] Filtro ativo. Disponível em: <http://www.te1.com.br/2012/01/filtrosandoba4558/#axzz4ldGYIgWi>. Acesso em: 27 de Agosto de 2016.
- [34] C. A. Desoer and E. S. Kuh, **Teoria Básica de Circuitos**, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1979.
- [35] H. Madan, “Design of microstrip bandpass filters,” *STP 2007 Project Report, Giant Meterwave Radio Telescope*, National Centre for Radio Astrophysics, Tata Institute of Fundamental Research, 2007.
- [36] Disponível em: <http://www.microwaves101.com/discussion-board-m/encyclopedia/115-frequency-letter-bands> Acesso em: 30 de julho de 2016.

- [37] Disponível em:
http://www.rfmw.org/introduction_to_rf_and_microwave_engineering_the_rf_and_microwave_spectrum_frequency_ranges.html. Acesso em: 30 de julho de 2016.
- [38] L. L. Souza, **Análise e Simulação de Filtros de Microfita Utilizando o Método FDTD**, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2015.
- [39] R. M. S. Cruz et al., "Caracterização de filtros em linhas de microfita com planos de terra fractais," *XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT'08*, Brasil, Rio de Janeiro-RJ, 2008.
- [40] V. F. Barros et al, "Projeto e análise de filtros em microfita a partir de um plano de terra inclinado," *XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações- sbrt'11*, Brasil, Curitiba-PR, 2011.
- [41] S. Neto, **Caracterização de Circuitos Planares de Micro-ondas pelo Método Iterativo das Ondas**, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dissertação de Mestrado 2013.
- [42] F. G. Ferreira et al., "Filtro passa-faixa em tecnologia de microfita," *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, v. 6, n. 2, 2014.
- [43] APPCAD. Disponível em: <<http://www.hp.woodshot.com>>. Acesso em: 20 de Fevereiro de 2016.
- [44] ANSYS. Disponível em: <<http://www.ansys.com>>. Acesso em: 25 de Fevereiro de 2016.