



Amaro Flôr Neto

**Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska com
Anéis Retangulares e Circulares**

João Pessoa - PB
Julho de 2020



Amaro Flôr Neto

Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska com Anéis Retangulares e Circulares

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

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Alfrêdo Gomes Neto

Coorientador: Prof. Dr. Joabson Nogueira de Carvalho

João Pessoa – PB

Julho de 2020

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

F632f

Flôr Neto, Amaro

Filtros planares baseados na geometria *matrioska* com anéis retangulares e circulares / Amaro Flôr Neto. – 2020. 62 f. : il.

Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2020.

Orientador : Prof. D.r Alfrêdo Gomes Neto.

Coorientador : Prof. D.r Joabson Nogueira de Carvalho.

1.Filtros planares. 2. Geometria *matrioska*. 3. Anéis retangulares. 4. Anéis circulares. 5. Miniaturização. I. Título.

CDU 621.396.67(043)

Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska com Anéis Retangulares e Circulares

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

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em _01/_07/_2020_.

BANCA EXAMINADORA



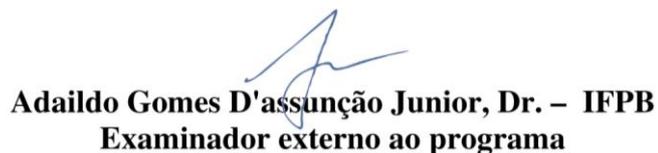
Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Orientador



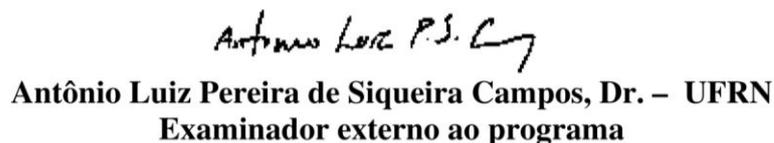
Joabson Nogueira de Carvalho, Dr. – IFPB
Coorientador



Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Examinador interno



Adaildo Gomes D'assunção Junior, Dr. – IFPB
Examinador externo ao programa



Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos, Dr. – UFRN
Examinador externo ao programa

João Pessoa – PB
Julho de 2020

Ao Senhor de todas as coisas, que me deu forças para superar todos os obstáculos. À minha esposa Joseane e meus filhos Matheus e Felipe, por serem fonte de luz na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Devemos pedir sabedoria a Deus para enfrentar as dificuldades da vida, pois com ela somos capazes de extrair o que temos de melhor dentro de nós. Certamente, os desafios nos fortalecem e tornam as conquistas mais gloriosas.

Diante dessa conquista, gostaria de agradecer especialmente à minha amada esposa Joseane, mulher forte e guerreira, pois mesmo diante do maior desafio de nossas vidas, sempre me apoiou e incentivou nessa jornada pelo conhecimento. Aproveito e peço desculpas pelos momentos os quais não foi possível dar toda a atenção que ela merece.

Aos meus filhos Matheus e Felipe, por todo o apoio e compreensão, pois muitas vezes sofreram com minha ausência durante esse período difícil em que cursei o mestrado.

Aos meus pais e irmãos, pelo amor e dedicação em todos os momentos, pois a base familiar é joia rara na atual sociedade.

Ao meu orientador, Professor Alfrêdo, não só pela orientação e atenção dispensada, mas por sua paciência e compreensão no momento mais difícil de minha vida.

Ao professor Joabson e demais professores do PPGEE, pela difusão de conteúdo técnico e humano repassado aos alunos do mestrado.

Aos amigos e colegas do mestrado, pelos momentos de convivência e trocas de experiências que enriqueceram as nossas vidas.

Aos amigos de trabalho na ANATEL, representados na pessoa do gerente da Unidade Operacional da Paraíba, Giordano Feitoza, pelo incentivo e pela compreensão durante as minhas ausências em razão dos estudos.

E aos respeitáveis professores da banca examinadora.

*“As raízes do estudo são amargas,
mas seus frutos são doces.”*

Aristóteles

RESUMO

Os filtros são dispositivos essenciais nos sistemas de telecomunicações, pois são responsáveis pela seleção de sinais e, conseqüentemente, redução de possíveis interferências que prejudiquem a qualidade da informação. Os desafios impostos pelo uso compartilhado do espectro de radiofrequência, bem como as diferentes aplicações que exigem maior seletividade na resposta em frequência, impulsionam a pesquisa e o desenvolvimento de novos dispositivos. Nos últimos anos, no Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, do Instituto Federal da Paraíba (GTEMA-IFPB), as pesquisas avançaram na utilização de filtros planares com geometria matrioska, inicialmente desenvolvida para as superfícies seletivas em frequência (FSS). Nos filtros com geometria matrioska, em conjunto com a miniaturização, destacam-se a considerável redução da frequência de ressonância e a rápida transição da faixa de passagem para a faixa de rejeição. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de filtros rejeita-faixa baseados na geometria matrioska com anéis retangulares, aplicados na faixa de Wi-Fi, especificamente em 2,4 GHz. Além disso, é apresentado o desenvolvimento de filtros baseados na geometria matrioska com anéis circulares em várias frequências. Para os anéis retangulares são utilizadas equações iniciais de projeto desenvolvidas em trabalhos recentes, alcançando-se bons resultados na aplicação proposta. Analogamente, são propostas equações iniciais de projeto para os filtros com anéis circulares. Foram projetados, fabricados e caracterizados numericamente e experimentalmente treze filtros, sendo quatro com anéis retangulares e nove com anéis circulares. Pela concordância dos resultados, verificou-se a aplicabilidade das equações iniciais de projeto. As características obtidas de miniaturização, elevada atenuação e rápida transição da faixa de passagem para a faixa de rejeição conferem aos filtros desenvolvidos um elevado potencial para aplicações nos sistemas de telecomunicações.

Palavras-chave: Filtros planares, geometria matrioska, anéis retangulares, anéis circulares, miniaturização.

ABSTRACT

Filters are essential devices in telecommunication systems because they are responsible for signal selection and, consequently, reduction of possible interferences which may damage the quality of information. The challenges imposed by shared use of radiofrequency spectrum, as well as different applications demanding a higher selectivity in frequency response, boost research and the development of new devices. In the last years, at Applied Electromagnetism and Telecommunications Group, from Federal Institute of Paraíba (GTEMA-IFPB), researches have moved forward in the use of planar filters with matryoshka geometry, initially developed for frequency selective surfaces (FSS). In filters with matryoshka geometry, along with miniaturization, stand out the considerable reduction of resonant frequency and the fast transition from passband to rejection band. In this work the development of band-reject filters based on matryoshka geometry with rectangular rings, applied in Wi-Fi band, specifically in 2.4 GHz, is presented. Besides, the development of filters based on matryoshka geometry with circular rings in various frequencies is presented. For the rectangular rings, project initial equations developed in recent works are used, reaching out good outcomes in the application proposed. Similarly, project initial equations to the filters with circular rings are proposed. Thirteen filters have been designed, manufactured and characterized numerically and experimentally, four of them of rectangular rings and nine of them of circular rings. From the conformity of the results, project initial equations applicability have been verified. The obtained characteristics of miniaturization, high attenuation and fast transition from the passband to the rejection band give the developed filters a high potential for applications in telecommunication systems.

Key words: Planar filters, matryoshka geometry, rectangular rings, circular rings, miniaturization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estações de telecomunicações compartilhando a mesma infraestrutura [5]	16
Figura 2 – Exemplo de esquema utilizado para suprimir um sinal interferente, adaptado [8].	17
Figura 3 – Bonecas matrioskas [13].	18
Figura 4 – Geometria matrioska com três anéis retangulares [16].	19
Figura 5 – Respostas em frequência de filtros ideais.	20
Figura 6 – Largura de banda, frequências de ressonância e corte em um filtro rejeita-faixa...21	
Figura 7 – Resposta em frequência de um filtro passa-baixas real.	22
Figura 8 – Simbologia e circuito de um filtro passa-baixas.	22
Figura 9 – Resposta em frequência de um filtro passa-altas.	23
Figura 10 – Simbologia e circuito de um filtro passa-altas.	23
Figura 11 – Resposta em frequência de um filtro passa-faixa.....	24
Figura 12 – Simbologia e circuito de um filtro passa-faixa.	25
Figura 13 – Resposta em frequência de um filtro rejeita-faixa.	25
Figura 14 – Simbologia e circuito de um filtro passa-faixa	26
Figura 15 – Parâmetros de faixas de frequência de um filtro passa-baixa [12].	28
Figura 16 – Filtro passivo [24].	29
Figura 17 – Filtro ativo [25].	30
Figura 18 – Exemplos de componentes concentrados utilizados nos filtros.	30
Figura 19 – Filtro construído com componentes distribuídos.	31
Figura 20 – Filtros de micro-ondas [29], [30].	31
Figura 21 – Constituição básica de uma microfita, adaptado de [32].	32
Figura 22 – Tela do aplicativo AppCAD [33].	34
Figura 23 – Utilização de <i>stubs</i> (tocos) para obtenção de capacitores ou indutores [9].	34
Figura 24 – Exemplos da utilização de descontinuidades e seus circuitos equivalentes [9]. ...	35
Figura 25 – Exemplos de ressonadores produzidos em microfita [9].	35
Figura 26 – Filtro rejeita-faixa (ressonador em forma de C) e seu circuito equivalente [12]. .	37
Figura 27 – Ressonadores matrioska com dois e três anéis retangulares.	38
Figura 28 – Resposta em frequência de filtros matrioska com dois anéis retangulares	39
Figura 29 – Filtro rejeita-faixa (ressonador em forma de C) e seu circuito equivalente.....	40
Figura 30 – Ressonadores matrioska com dois e três anéis circulares.	40
Figura 31 – Resposta em frequência típica de um ressonador matrioska com dois anéis.	43
Figura 32 – Placas condutoras após processo de limpeza e colagem de adesivos	44

Figura 33 – Filtros 1 a 4, fabricados com anéis retangulares.	45
Figura 34 – Configuração utilizada na caracterização experimental.....	45
Figura 35 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz) para o ressonador em C, filtro 1.....	46
Figura 36 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para o ressonador matrioska, filtro 2.....	47
Figura 37 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para o ressonador matrioska em série , filtro 3.	48
Figura 38 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para o ressonador matrioska retangular , filtro 4.	50
Figura 39 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para os filtros 1 a 4.....	51
Figura 40 – Filtros 5 a 8, fabricados com um anel circular.	52
Figura 41 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para os filtros 5 a 8.....	52
Figura 42 – Filtros 9 a 12, fabricados com dois anéis circulares.	53
Figura 43 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para os filtros 9 a 12.....	54
Figura 44 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para os filtros 9 a 12.....	54
Figura 45 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para os filtros 9 e 13.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações utilizadas em todas as simulações.....	42
Tabela 2 – Resultados experimentais do filtro 1.....	46
Tabela 3 – Resultados experimentais do filtro 2.....	47
Tabela 4 – Resultados experimentais do filtro 3.....	49
Tabela 5 – Resultados experimentais do filtro 4.....	50
Tabela 6 – Comparação de resultados experimentais dos filtros 1 a 4.....	51
Tabela 7 – Comparação de resultados experimentais de filtros com um anel circular.....	53
Tabela 8 – Comparação de resultados experimentais de filtros com dois anéis circulares..	55

LISTA DE SIGLAS

AL	Atenuação livre
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BW	Largura de banda
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
DGS	<i>Defected Ground Structure</i>
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>
FSS	Superfície seletiva em frequência
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
IL	Perda de inserção
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
PDFF	Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
RF	Radiofrequência
PTFE	Politetrafluoretileno
RL	Perda de retorno
SHF	<i>Super High Frequency</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitor
dx_f	<i>Drawing Exchange Format</i>
d_y	Espaçamento entre anéis nos filtros matrioska
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa (Constante dielétrica)
ϵ_{ref}	Permissividade elétrica relativa efetiva (Constante dielétrica efetiva)
f_c	Frequência de corte
f_h	Frequência de corte superior
f_l	Frequência de corte inferior
f_r	Frequência de ressonância
f_{r1}	Primeira frequência de ressonância no ressonador matrioska
f_{r2}	Segunda frequência de ressonância no ressonador matrioska
g	Largura da fenda
h	Espessura do substrato dielétrico
L	Indutor
L_{ef}	Comprimento efetivo do anel matrioska
L_{ext}	Comprimento externo do anel matrioska
L_{int}	Comprimento interno do anel matrioska
P1	Porta 1
P2	Porta 2
P_i	Potência incidente
P_r	Potência refletida
P_t	Potência transmitida
R_{ext}	Raio externo de um anel circular matrioska
R_{int}	Raio interno de um anel circular matrioska
S_{21}	Parâmetro S, equivalente ao coeficiente de transmissão
t	Espessura da camada de metalização da linha de microfita
u	Razão entre a largura da linha de microfita e espessura de seu substrato dielétrico
V_i	Tensão incidente
V_{in}	Tensão de entrada
V_{out}	Tensão de saída
V_r	Tensão refletida

V_t	Tensão transmitida
W	Largura da linha de microfita
W_0	Largura da linha de alimentação da microfita
Y_{in}	Admitância de entrada da linha de transmissão
Z_0	Impedância característica da linha de transmissão
Z_{in}	Impedância de entrada da linha de transmissão
λ_0	Comprimento de onda no vácuo
λ_g	Comprimento de onda guiado
τ_g	Atraso de grupo
τ_p	Atraso de fase
φ_{21}	Fase do sinal na saída do filtro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 Resposta em frequência	20
2.1.1 Filtro passa-baixas	22
2.1.2 Filtro passa-altas	23
2.1.3 Filtro passa-faixa.....	24
2.1.4 Filtro rejeita-faixa	25
2.1.5 Parâmetros relevantes	26
2.2 Filtros passivos e ativos	29
2.3 Filtros digitais e analógicos	30
2.4 Filtros que utilizam componentes concentrados ou componentes distribuídos.....	30
2.5 Filtros de micro-ondas	31
2.6 A microfita.....	32
2.6.1 Ressonadores em microfita.....	34
3 GEOMETRIA MATRIOSKA	37
3.1 Geometria matrioska com anéis retangulares	37
3.2 Geometria matrioska com anéis circulares	40
4 RESULTADOS OBTIDOS	42
4.1 Geometria matrioska com anéis retangulares: resultados numéricos e experimentais ...	44
4.1.1 Filtro com um ressonador em forma de C	46
4.1.2 Filtro com dois anéis quadrados	46
4.1.3 Filtro com dois ressonadores em série.....	48
4.1.4 Filtro com dois anéis retangulares	49
4.2 Geometria matrioska com anéis circulares: resultados numéricos e experimentais	52
4.2.1 Filtros com um anel circular	52
4.2.2 Filtros com dois anéis circulares.....	53

4.2.3 Filtro com três anéis circulares	56
5 CONCLUSÃO	57
5.1 Considerações finais	57
5.2 Sugestões e continuidade dos trabalhos.....	58
TRABALHOS PUBLICADOS	59
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

O ser humano busca constantemente melhorar a forma de comunicação, afinal a interação social é elemento fundamental no desenvolvimento do homem, animal racional que expressa seus desejos e necessidades, em regra, se comunicando. Outrora restrita à proximidade entre os interlocutores, a comunicação obteve um grande avanço com o advento da radiocomunicação, pois graças ao domínio dessa tecnologia, foi possível o estabelecimento da comunicação pelo espaço aberto, e em tempo real, por meio de códigos, textos, voz, imagens ou vídeos, surgindo a telecomunicação como conhecemos hoje [1], [2].

Não há dúvidas que atualmente a mobilidade é a palavra chave nas telecomunicações. Assim, os *smartphones* e suas incontáveis aplicações já fazem parte da vida de mais de três bilhões de usuários em todo o mundo [3]. Além disso, o uso dos sistemas de comunicação sem fio está presente em inúmeros dispositivos, tais como: *tablets*, *notebooks*, *drones*, câmeras IP, controles de acesso e outros equipamentos que compõem a chamada Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT) [4].

Com a necessidade crescente por serviços móveis integrados, a convergência digital enfrenta alguns entraves no âmbito da mobilidade. As restrições de utilização dos espaços destinados às estações de telecomunicações e a própria limitação do espectro de radiofrequência são os principais problemas enfrentados. O compartilhamento de infraestrutura de diversas estações e tecnologias, Figura 1, ajuda a mitigar um desses entraves, especialmente nos grandes centros urbanos, já que essas regiões possuem mais restrições de uso e ocupação do solo.



Figura 1 – Estações de telecomunicações compartilhando a mesma infraestrutura [5]

Já as limitações inerentes ao espectro de radiofrequência podem causar degradações indesejadas na qualidade da informação, especialmente em certas faixas compartilhadas e com elevada ocupação. Por ser um recurso escasso, a radiofrequência necessita de uma alocação assertiva para minimizar esses problemas.

Diante desse cenário, a utilização das faixas de frequências disponíveis deve ser organizada da forma mais adequada possível, destacando-se entre essas, as faixas de Wi-Fi, de 2,400–2,483 GHz, e de 5,150–5,850 GHz, organizadas no Brasil pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), integrando atualmente o Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil (PDFF) [6] na área de Aplicações Industriais, Científicas e Médicas (ISM), segundo tratados e acordos internacionais celebrados junto à *International Telecommunication Union* (ITU).

Como a ocupação dessas faixas de frequências é bastante elevada, mesmo com medidas regulatórias limitando a utilização do espectro radioelétrico [7], em algumas aplicações esses sinais podem se apresentar como uma interferência.

Visando minimizar os efeitos destrutivos causados pela interferência, pesquisadores buscam desenvolver soluções tecnológicas, por exemplo, os filtros, que desempenham um papel fundamental nos sistemas de telecomunicações. A Figura 2 exemplifica o uso de um filtro rejeitando sinais indesejáveis da informação propriamente dita [8].

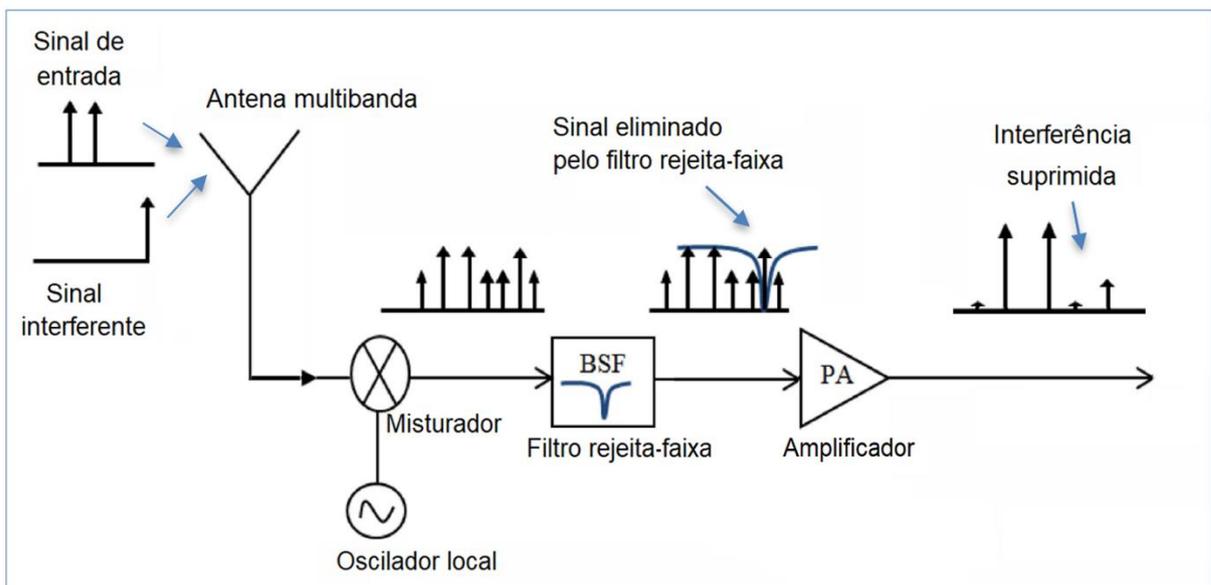


Figura 2 – Exemplo de esquema utilizado para suprimir um sinal interferente, adaptado [8].

Nessa conjuntura, esses dispositivos continuam sendo objeto de inúmeras pesquisas, pois o aumento do número de aplicações dos sistemas de telecomunicações sem fio exige parâmetros cada vez mais delimitados das faixas de frequência utilizadas.

Ainda hoje os projetos de filtros possuem relevância nas pesquisas acadêmicas e na indústria, mesmo sendo uma das tecnologias mais consolidadas no âmbito das comunicações sem fio [9], [10]. Os desafios impostos pelo uso compartilhado do espectro de radiofrequência, bem como as diferentes aplicações que exigem maior seletividade na resposta em frequência, impulsionam a pesquisa e o desenvolvimento de novos dispositivos. Parâmetros relacionados ao custo, miniaturização, processo fabril, entre outros, têm grande importância nos projetos e devem ir ao encontro das demandas que o mercado apresenta.

Alinhado às demandas da área de micro-ondas, o Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA), do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), tem desenvolvido pesquisas de dispositivos com novas formas geométricas, como a fabricação e caracterização de filtros em microfita inspiradas em matrioskas [11], [12].

A geometria proposta pelos pesquisadores do GTEMA foi inspirada nas tradicionais bonecas russas ou simplesmente matrioskas [13], Figura 3, feitas de madeira e com múltiplas unidades no seu interior, ou seja, a mesma boneca em tamanhos diferentes e que são dispostas umas dentro das outras.



Figura 3 – Bonecas matrioskas [13].

Basicamente, assim como nas matrioskas, os elementos que compõem os anéis dos filtros estão interligados e inseridos uns dentro dos outros, limitando sua área ao elemento mais externo. Esse princípio foi utilizado inicialmente em superfícies seletivas em frequência, FSS, [14], [15], [16], sendo expandido para os filtros em microfita [11], [12].

Os filtros baseados na geometria matrioska apresentam como principais características, a considerável redução da frequência de ressonância e a rápida transição da faixa de passagem

para a faixa de rejeição. De modo diferente ao apresentado nos ressonadores com anéis concêntricos, nas configurações baseadas na geometria matrioska, os anéis internos permanecem interligados, formando um único elemento como a expansão mostrada na Figura 4, resultando assim em um maior comprimento efetivo e, conseqüentemente, na miniaturização do filtro.

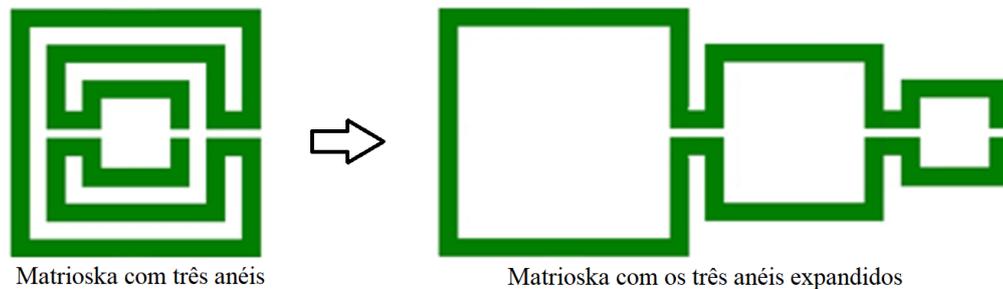


Figura 4 – Geometria matrioska com três anéis retangulares [16].

Dando continuidade às pesquisas iniciadas no GTEMA, este trabalho apresenta o desenvolvimento de filtros planares baseados na geometria matrioska com anéis retangulares, aplicados em sistemas de comunicação sem fio, na faixa de Wi-Fi, especificamente na faixa de 2,4 GHz. Além disso, é apresentado o desenvolvimento de filtros planares baseados na geometria matrioska com anéis circulares em várias faixas de frequência, dessa forma é possível avaliar o comportamento dessa nova configuração proposta.

Os próximos capítulos deste trabalho estão organizados da seguinte forma:

- No Capítulo 2 são abordados conceitos fundamentais sobre filtros seletores de frequência, incluindo suas classificações e principais características. Esse Capítulo também aborda a importância da microfita e ressonadores planares.

- No Capítulo 3 é apresentada a caracterização dos filtros baseados na geometria matrioska, tanto para anéis retangulares como para circulares.

- No Capítulo 4 são apresentados os resultados numéricos e experimentais dos filtros planares baseados na geometria matrioska com anéis retangulares, aplicados na faixa de 2,4 GHz. Adicionalmente, são apresentados os resultados numéricos e experimentais dos filtros baseados na geometria matrioska com anéis circulares, em diversas faixas de frequência.

- Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões da dissertação, bem como sugestões para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os filtros são dispositivos fundamentais nos sistemas de telecomunicações, separando e delimitando sinais de radiofrequência dentro de determinadas faixas do espectro radioelétrico, minimizando assim os efeitos indesejáveis de interferências e ruídos [9]. Sistemas de radiodifusão, telefonia móvel, radares, radiolocalização, comunicação via satélite e Wi-Fi, são apenas alguns exemplos de uso dos filtros, mas eles estão presentes desde as fontes de tensão até os sistemas de áudio.

Integrando desde os primeiros sistemas de telecomunicações até os mais modernos equipamentos utilizados atualmente, o desenvolvimento desses dispositivos merece atenção especial nas pesquisas de engenharia [17]. Dessa forma, as suas principais características devem ser estudadas de modo que os projetos sejam customizados para cada aplicação, resultando em maior eficiência dos sistemas nos quais encontram-se inseridos. Os filtros apresentam algumas classificações que serão apresentadas a seguir.

2.1 Resposta em frequência

Em relação à sua principal característica de operação, a resposta em frequência, os filtros são usualmente classificados em: passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa [9], [10], [19]. As curvas de resposta em frequência, ganho em função da frequência, de forma ideal, são apresentadas na Figura 5.

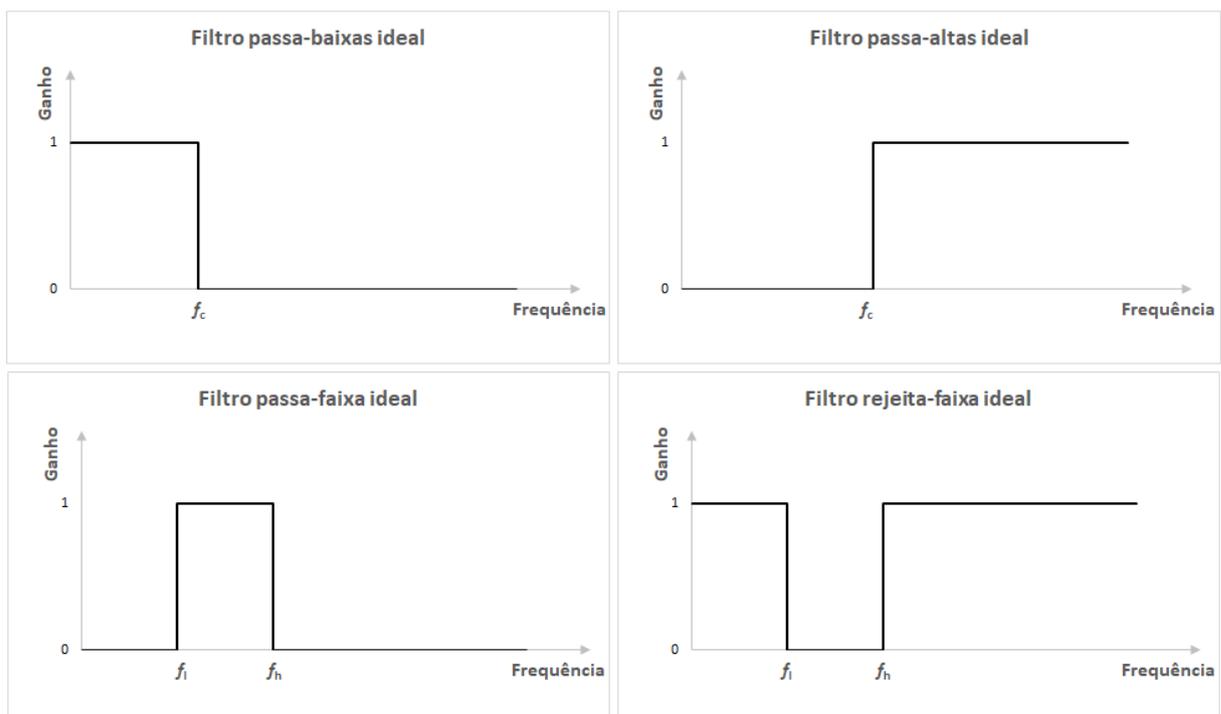


Figura 5 – Respostas em frequência de filtros ideais.

Em um filtro real, a resposta em frequência não se apresenta perfeitamente seletiva como nos degraus mostrados na Figura 5, pois há variações do sinal com o aumento das frequências analisadas, causadas pelas respostas associadas de seus componentes (resistores, indutores e capacitores).

São considerados parâmetros de operação, entre outros, a frequência de ressonância (f_r) e a frequência de corte (f_c). No caso dos filtros passa-faixas e rejeita-faixas, a frequência de ressonância é aquela na qual obtém-se a melhor resposta do sinal de saída, de acordo com a necessidade de passagem ou rejeição do sinal de entrada, ocasionado pelos efeitos capacitivos e/ou indutivos do circuito [9], [18].

A frequência de corte é aquela na qual a potência do sinal de saída cai 3 dB em relação ao seu máximo valor, ou seja, apresenta metade do valor máximo possível que a potência do sinal de saída pode assumir, delimitando a largura de banda do dispositivo [9], [10], [19]. Em termos da tensão do sinal, a queda de 3 dB na potência de saída equivale ao valor de aproximadamente 70,7% da tensão máxima de saída [19]. A Figura 6 ilustra, para um filtro rejeita-faixa, a frequência de ressonância (f_r), as frequências de corte inferior (f_i) e superior (f_h), bem como sua largura de banda (BW).

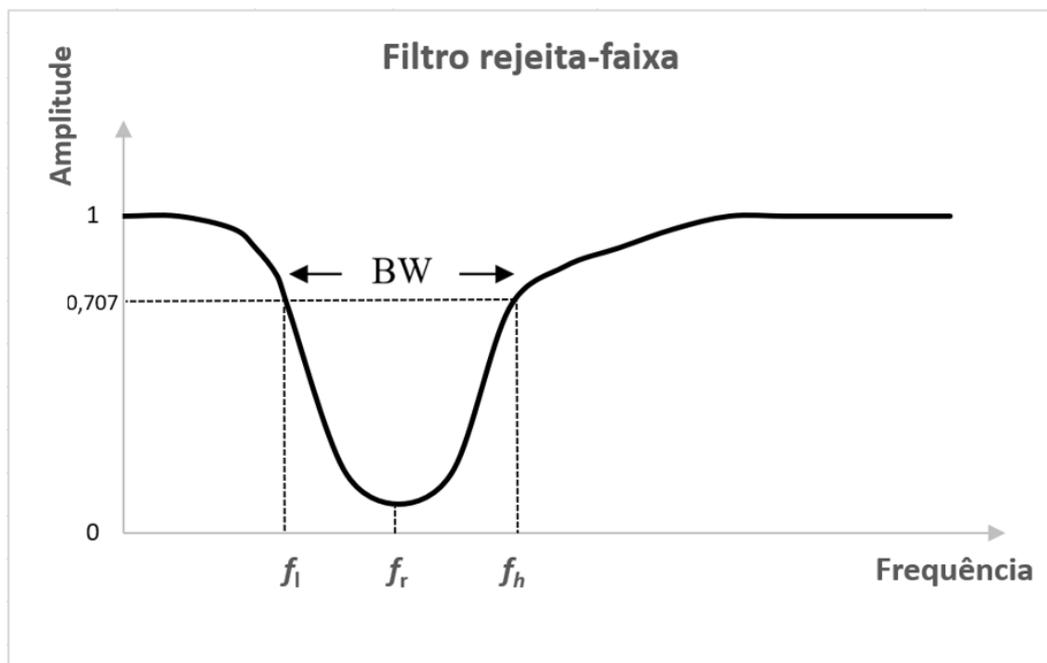


Figura 6 – Largura de banda, frequências de ressonância e corte em um filtro rejeita-faixa.

Além da frequência de ressonância, frequência de corte e largura de banda, mais adiante serão detalhados outros parâmetros de operação considerados relevantes em todos os filtros, entre eles, a faixa de transição, perda de inserção e perda de retorno.

2.1.1 Filtro passa-baixas

A função do filtro passa-baixas é permitir a passagem de sinais que possuam frequências abaixo da frequência de corte (f_c), atenuando o máximo possível os sinais com frequências superiores [9], [18]. Diferentemente do degrau apresentado na curva ideal (Figura 5), a curva típica de resposta em frequência, Figura 7, ilustra o comportamento de um filtro passa-baixas real, considerando o ganho em função da frequência.

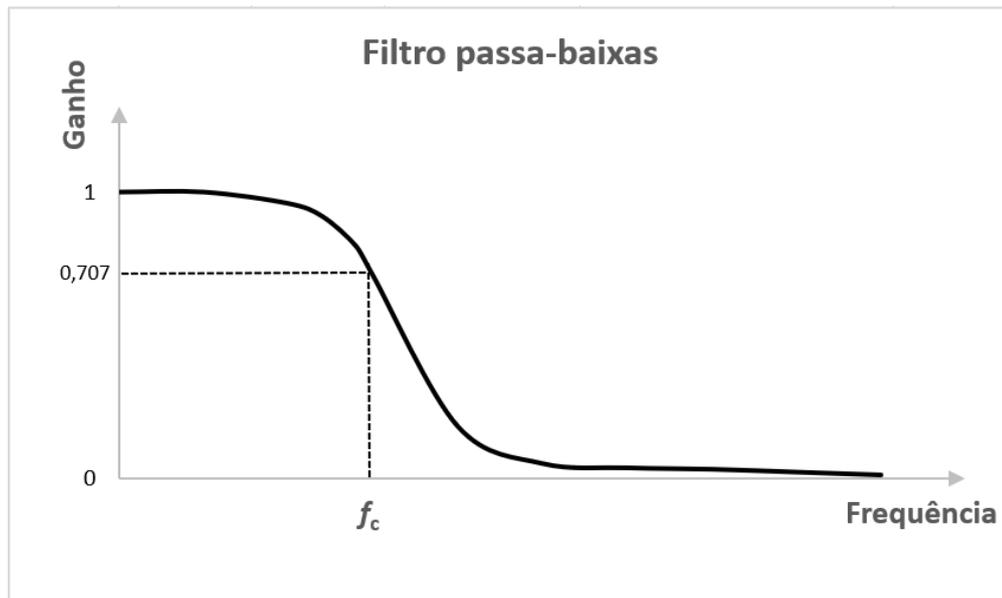


Figura 7 – Resposta em frequência de um filtro passa-baixas real.

O circuito equivalente (básico) de um filtro passa-baixas, do tipo RC, corresponde a uma associação em série, de um resistor e um capacitor [20], [21]. De acordo com o dimensionamento do capacitor, o circuito começa a bloquear as frequências mais altas por conta de sua reatância capacitiva, que diminui consideravelmente a partir da frequência de corte, impedindo que o sinal de entrada chegue à saída.

A simbologia usual do filtro passa-baixas, bem como seu circuito (básico ou equivalente, do tipo RC) são apresentados na Figura 8.

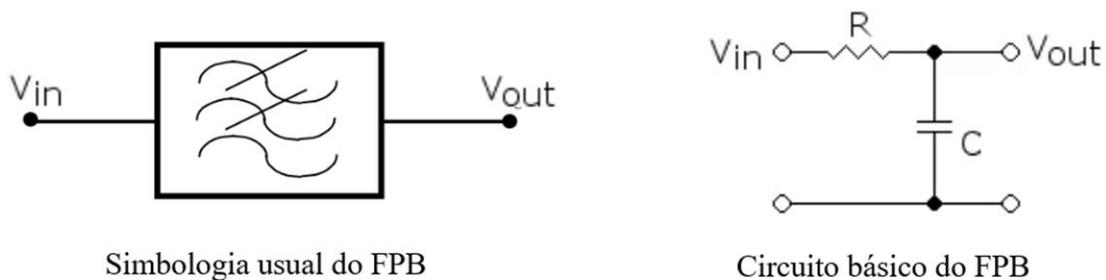


Figura 8 – Simbologia e circuito de um filtro passa-baixas.

2.1.2 Filtro passa-altas

Um filtro passa-altas é projetado para permitir a passagem de sinais que possuam frequências acima da frequência de corte (f_c), atenuando o máximo possível os sinais com frequências inferiores [9], [10], [18]. A curva típica de resposta em frequência, ganho em função da frequência, Figura 9, ilustra o comportamento de um filtro passa-altas real.

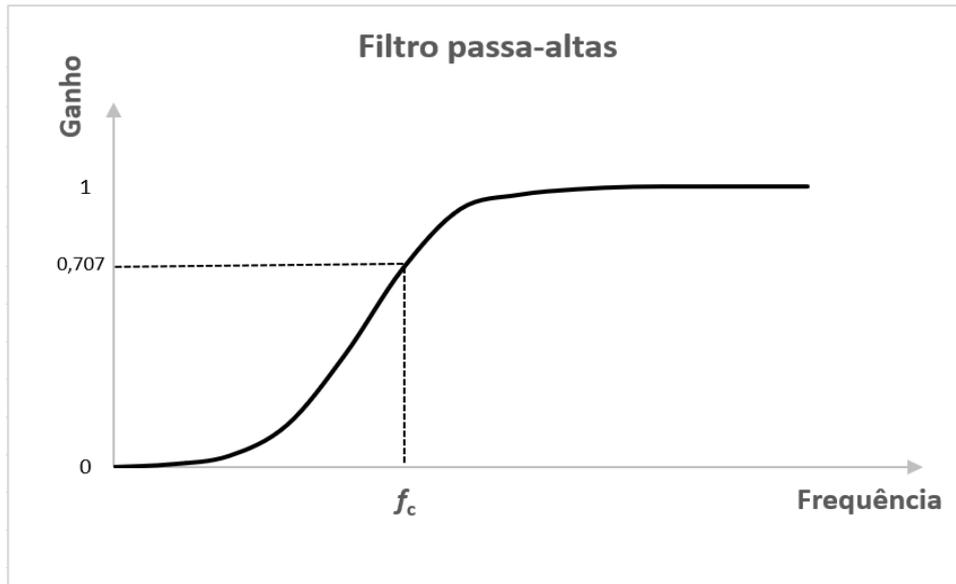


Figura 9 – Resposta em frequência de um filtro passa-altas.

O circuito equivalente (básico) de um filtro passa-altas, do tipo RC, corresponde a uma associação em série, de um capacitor e um resistor [20], [21]. Como a saída do sinal é retirada do resistor, em baixas frequências, o capacitor se comporta como um circuito aberto, impedindo a passagem do sinal de entrada. Já nas frequências mais altas, por conta da reatância capacitiva, que diminui consideravelmente a partir da frequência de corte, há oposição mínima à passagem dessas frequências, fazendo com que o sinal de entrada seja transferido para a saída.

A simbologia usual do filtro passa-alta, bem como seu circuito (básico ou equivalente, do tipo RC) são apresentados na Figura 10.

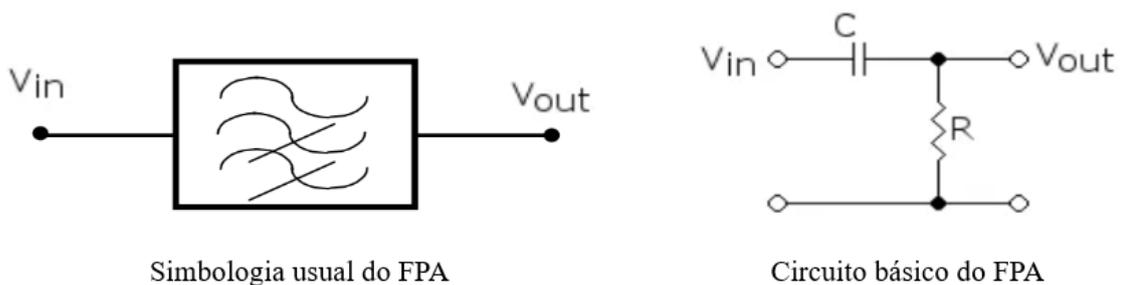


Figura 10 – Simbologia e circuito de um filtro passa-altas.

2.1.3 Filtro passa-faixa

Os filtros passa-faixa, como o próprio nome sugere, permitem a passagem de sinais de um determinado intervalo entre duas frequências de corte (f_{c1} e f_{c2}), ou também chamadas de frequência de corte inferior (f_l) e frequência de corte superior (f_h), atenuando o máximo possível os sinais com frequências fora dessa faixa desejada [9], [10], [18].

De modo geral, um passa-faixa pode ser considerado uma associação de um filtro passa-baixa com um passa-alta [22], assim, no domínio da frequência, teremos a atuação de cada circuito definindo a frequência de corte inferior e a frequência de corte superior.

A curva típica de resposta em frequência, ganho em função da frequência (Figura 11), ilustra o comportamento de um filtro passa-faixa real.

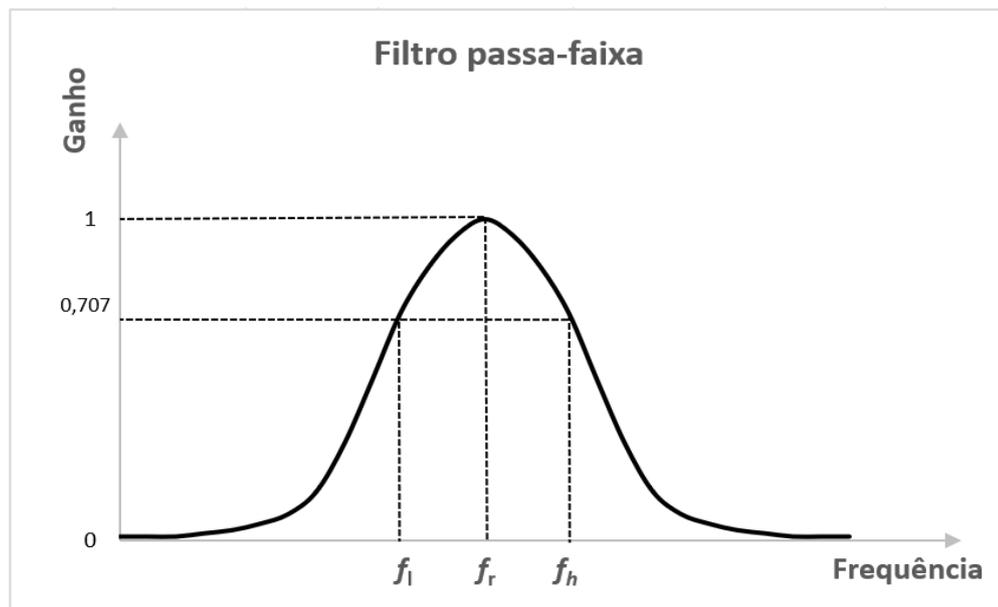


Figura 11 – Resposta em frequência de um filtro passa-faixa.

O circuito básico de um filtro passa-faixa, do tipo RLC, corresponde a uma associação em série, de um capacitor, um indutor e um resistor [20], [21]. Como a saída do sinal corresponde ao valor presente no resistor, no domínio da frequência, especialmente na faixa de passagem, os efeitos das reatâncias indutiva e capacitiva vão se anulando, fazendo com que o sinal de entrada seja entregue à saída (resistor). A frequência de ressonância é alcançada no instante em que as reatâncias indutiva e capacitiva se anulam por completo, obtendo-se o valor máximo possível do sinal na saída do filtro.

A simbologia usual do filtro passa-faixa, bem como seu circuito (básico ou equivalente, do tipo RLC) são apresentados na Figura 12.

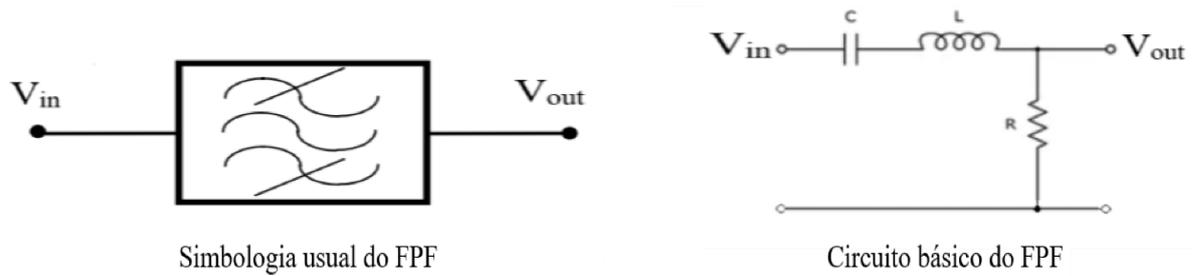


Figura 12 – Simbologia e circuito de um filtro passa-faixa.

2.1.4 Filtro rejeita-faixa

Os filtros rejeita-faixa têm a função de impedir a passagem de sinais em uma determinada faixa de frequência, atenuando-os o máximo possível entre a frequência de corte inferior e a frequência de corte superior [9], [19]. A curva típica de resposta em frequência, ganho em função da frequência, Figura 13, ilustra o comportamento de um filtro rejeita-faixa.

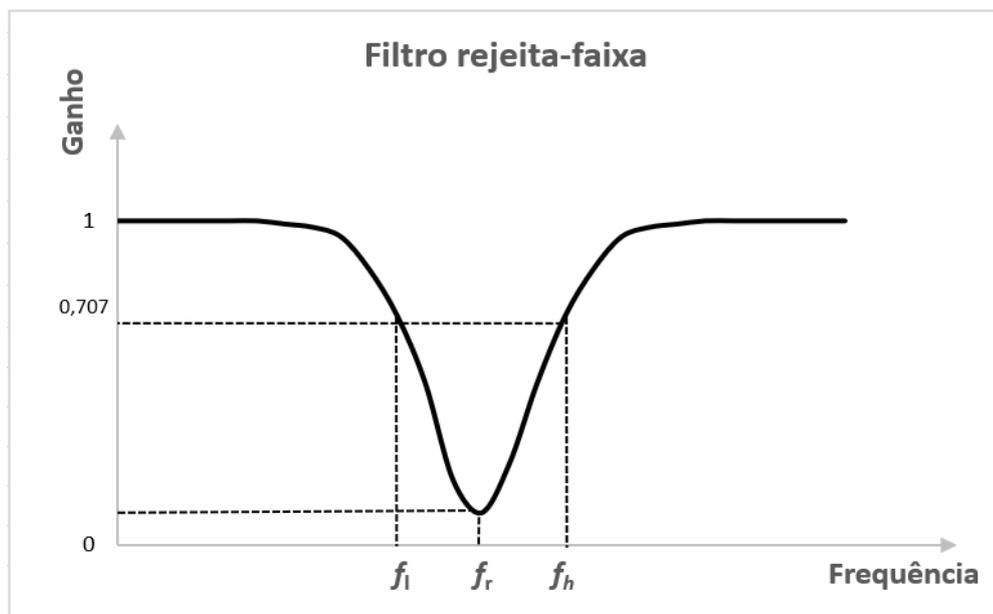


Figura 13 – Resposta em frequência de um filtro rejeita-faixa.

O circuito básico de um filtro rejeita-faixa, do tipo RLC, corresponde a uma associação em série, de um resistor, um indutor e um capacitor [20], [21]. Como a saída do sinal corresponde ao valor presente na associação série indutor/capacitor, no decorrer do domínio da frequência, especialmente na faixa de passagem, os efeitos das reatâncias indutiva e capacitiva vão se anulando, impedindo que o sinal de entrada seja entregue à saída. A frequência de ressonância é alcançada no instante em que as reatâncias indutiva e capacitiva se anulam por completo, obtendo-se o menor valor possível do sinal na saída do filtro.

Assim como os demais filtros, o rejeita-faixa utiliza as características intrínsecas dos indutores e capacitores (ou circuitos equivalentes), quais sejam, reatância indutiva e reatância capacitiva, para a seleção ou rejeição de determinadas faixas de frequências, com associações séries (aqui utilizadas) ou paralelas. Ressalta-se que, de forma simplista, o capacitor se comporta como um circuito aberto em baixas frequências e como um curto-circuito em altas frequências, já o indutor se comporta como um curto-circuito em baixas frequências e um circuito aberto nas frequências mais elevadas.

A simbologia usual do filtro rejeita-faixa, bem como seu circuito (básico ou equivalente, do tipo RLC) são apresentados na Figura 14.

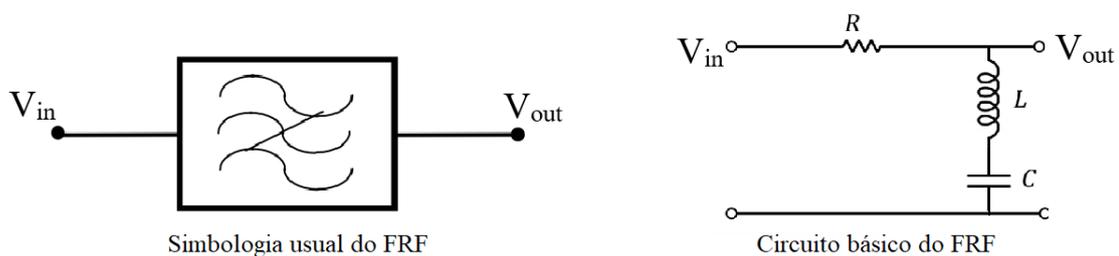


Figura 14 – Simbologia e circuito de um filtro passa-faixa

Também conhecido como *notch filter*, o filtro rejeita-faixa elimina os sinais em uma determinada faixa de frequência para, basicamente, garantir a supressão de interferências indesejáveis nas mais variadas aplicações possíveis, sejam elas de telecomunicações, eletroeletrônicas, médicas, científicas ou mesmo industriais.

2.1.5 Parâmetros relevantes

Além da frequência de ressonância e da frequência de corte, outros parâmetros merecem destaque na análise dos filtros, pois são importantes para a determinação da qualidade e seletividade dos circuitos, destacando-se: largura de banda, faixas de passagem e de rejeição, faixa de transição, atenuação, perda de retorno e perda de inserção [9], [10], [22].

A largura de banda, do inglês *bandwidth* (BW), representa o tamanho da faixa de operação do filtro, ou seja, indica a capacidade, em Hz, de passagem ou rejeição de sinais, em meia-potência, no dispositivo [10], [22]. A largura de banda pode ser calculada como:

$$BW = f_{c2} - f_{c1} \quad (1)$$

No caso de um filtro passa-baixas, a largura de banda corresponde à própria frequência de corte (f_c), pois sua frequência de corte inferior é considerada zero.

Considerando a frequência de ressonância de um filtro e suas frequências de corte (largura de banda, BW), é possível calcular sua largura de banda fracionária, em percentual (BW%), sendo:

$$BW\% = \frac{BW}{f_r} \times 100\% \quad (2)$$

De acordo com a largura de banda fracionária, os dispositivos podem ser divididos em banda estreita, banda larga ou banda ultralarga. Dispositivos com BW% menores que 5% são denominados de banda estreita, os que possuem BW% entre 5 e 25% podem ser considerados de banda larga, já os que possuem BW% superiores a 25% são de banda ultralarga [10].

A faixa de passagem corresponde a toda a faixa de frequência na qual o sinal de saída possui valor maior do que o nível presente na frequência de corte, resultando assim em uma passagem do sinal sem perdas significativas (há oposição mínima ao sinal de entrada). Esse parâmetro é utilizado essencialmente nos filtros passa-baixas e passa-faixa, pois remete à toda a faixa de operação desses filtros.

Diferentemente da faixa de passagem, a faixa de rejeição é um parâmetro que indica toda a faixa de frequência na qual o sinal de saída é efetivamente atenuado, considerando os parâmetros de sensibilidade, resultando assim em perdas significativas do sinal de entrada. Esse parâmetro é utilizado essencialmente no filtro rejeita-faixa, pois remete à toda a faixa de operação desse tipo de filtro.

As faixas de passagem e de rejeição são parâmetros complementares em relação à largura de banda e estão ligados à aplicação do filtro, preferencialmente alinhados à sua canalização comercial, considerando, é claro, possível convivência mínima com canais adjacentes [17], [19].

A faixa de transição é um parâmetro bastante importante, especialmente para os filtros passa-baixas e passa-altas, pois indica quão seletiva é a resposta em frequência nesses tipos de filtros. Ao apresentar uma curva de resposta em frequência bastante íngreme, o filtro indica boa seletividade, resultando em maior eficiência e aplicabilidade [10], [11]. A faixa de transição, em Hz, expressa a faixa de frequências compreendida entre a frequência de corte e a de rejeição (ou de passagem).

A atenuação corresponde ao decaimento do sinal na saída do filtro. Considerando as características da aplicação, a atenuação mínima desejada é aquela que garante a função proposta pelo filtro, onde a faixa de rejeição apresenta valores adequados à sensibilidade do sistema [19].

É possível visualizar alguns dos parâmetros abordados até aqui, na resposta em frequência de um filtro passa-baixas, Figura 15, destacando-se em amarelo as faixas de passagem, de transição e de rejeição, nesta ordem.

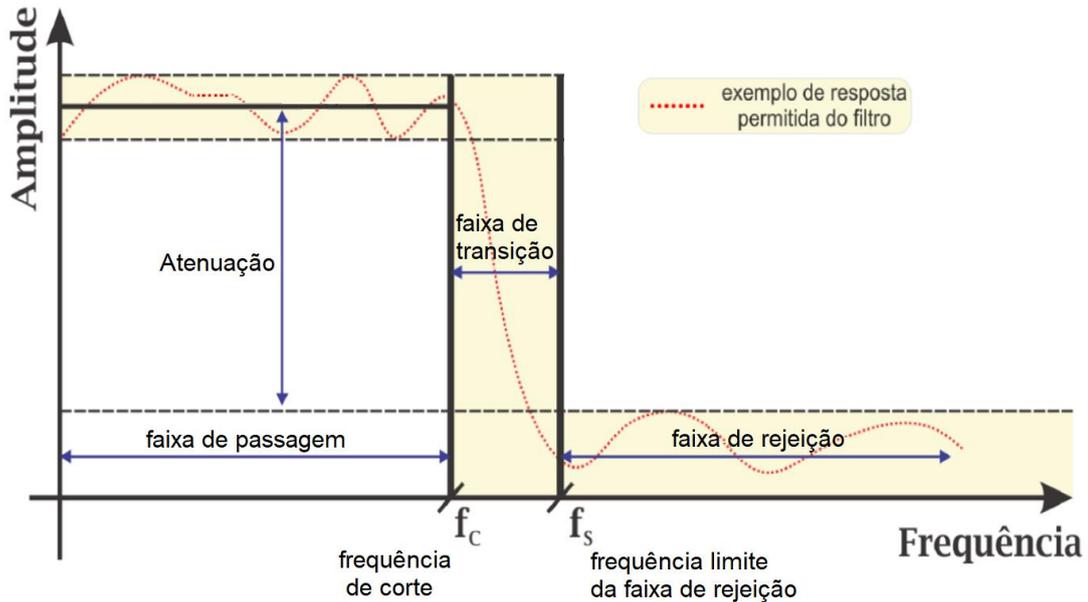


Figura 15 – Parâmetros de faixas de frequência de um filtro passa-baixa [12].

Parâmetro bastante utilizado na prática, a perda de retorno (*return loss*) pode ser definida como sendo a razão, em dB, entre a potência refletida (P_r) e a potência incidente (P_i) em determinado dispositivo [9], [10], [23].

$$RL = -10 \log\left(\frac{P_r}{P_i}\right) = -20 \log\left(\frac{V_r}{V_i}\right) \quad (3)$$

Já a perda de inserção (*insertion loss*) corresponde à razão, em dB, entre a potência transmitida e a potência incidente [9], [10], [23]. A perda de inserção pode ser vista como a potência perdida por um sinal ao percorrer um determinado dispositivo.

$$IL = -10 \log\left(\frac{P_t}{P_i}\right) = -20 \log\left(\frac{V_t}{V_i}\right) \quad (4)$$

Quando o sinal percorre um filtro, ocorre um certo atraso no sinal de saída em relação ao sinal de entrada. Este atraso é caracterizado por dois parâmetros, quais sejam: atraso de fase e atraso de grupo.

O atraso de fase corresponde ao atraso da componente senoidal, ou seja, não necessariamente à informação transportada. Seu valor é dado em segundos e pode ser obtido por:

$$\tau_p = \frac{\varphi_{21}}{\omega} \quad (5)$$

Sendo φ_{21} a fase do sinal em radianos e ω a frequência angular em rad/s. O segundo parâmetro relacionado ao atraso do sinal, atraso de grupo, representa realmente o atraso da informação ao percorrer o filtro, sendo definido por:

$$\tau_g = -\frac{d\varphi}{d\omega} \quad (6)$$

Com características relevantes abordadas até aqui, inclusive com o detalhamento baseado na resposta em frequência, abre-se espaço para outras classificações importantes dos filtros, seja pelos métodos ou componentes utilizados em sua construção, tecnologia empregada ou até mesmo de acordo com área específica de aplicação desses dispositivos.

2.2 Filtros passivos e ativos

Filtros passivos são projetados e construídos exclusivamente com elementos passivos, quais sejam: resistores, indutores e capacitores, associados em arranjos série e/ou paralelo, conforme a configuração pretendida [10]. A Figura 16 ilustra um filtro passivo, construído com um resistor, um indutor e dois capacitores.

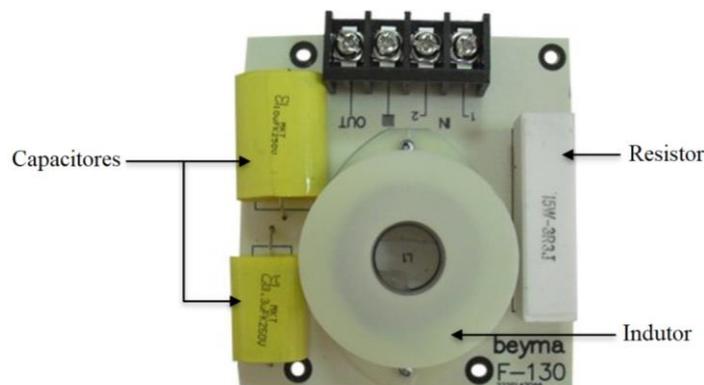


Figura 16 – Filtro passivo [24].

Nos filtros ativos, Figura 17, além de elementos passivos, são utilizados um ou mais componentes ativos, resultando em alguma amplificação do sinal. Entre esses componentes ativos, destacam-se os transistores e amplificadores.

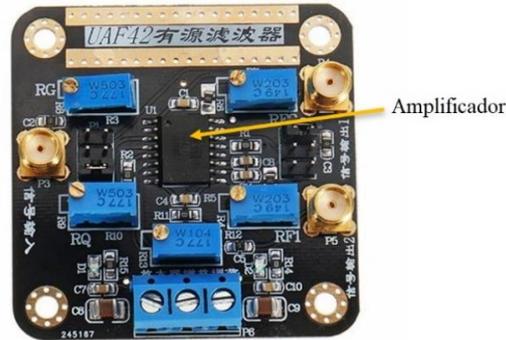


Figura 17 – Filtro ativo [25].

2.3 Filtros digitais e analógicos

Filtros implementados por meio de dispositivo lógico programável (*hardware*) e/ou *software* são classificados como digitais. Seu princípio básico de funcionamento consiste na conversão analógico/digital da informação (amostragem) e processamento digital [17], [26]. Filtros que não utilizam o processamento digital de sinais são denominados analógicos.

Nos filtros digitais, destacam-se os seguintes pontos positivos: flexibilização de suas características por *hardware* e/ou *software* e a possibilidade de se construir dispositivos com ordens muito altas (qualidade), dependendo, é claro, do número de bits empregados. Como necessitam de conversores analógico/digital (A/D) no lado do transmissor e digital/analógico (D/A) no lado do receptor, dependendo da aplicação proposta, o aumento do número de bits eleva a complexidade do *hardware*, resultando em maiores custos [26].

2.4 Filtros que utilizam componentes concentrados ou componentes distribuídos

A construção de filtros pode ser feita por meio de componentes concentrados, Figura 18, ou mesmo com a distribuição de componentes em trechos de linhas de transmissão, descontinuidades e tocos (*stubs*) [9], [10], [27]. Para aplicações em baixas frequências, a construção de filtros com componentes concentrados é bastante utilizada, pois podem ser adotados parâmetros diretos como resistência, impedância, capacitância e indutância, sem que se alterem os resultados das correntes e tensões envolvidas nos circuitos.



Figura 18 – Exemplos de componentes concentrados utilizados nos filtros.

Com o aumento da frequência de operação e, conseguinte, a redução do comprimento de onda para valores menores que os tamanhos reais dos componentes concentrados, não é mais possível avaliar os circuitos diretamente pelas correntes e tensões envolvidas [1], [9]. A análise dos parâmetros em altas frequências ocorre pelo estudo do comportamento dos campos eletromagnéticos distribuídos ao longo das estruturas não concentradas, incluindo a própria linha de transmissão [9], [10]. Na Figura 19, um filtro produzido com componentes distribuídos na linha de transmissão.

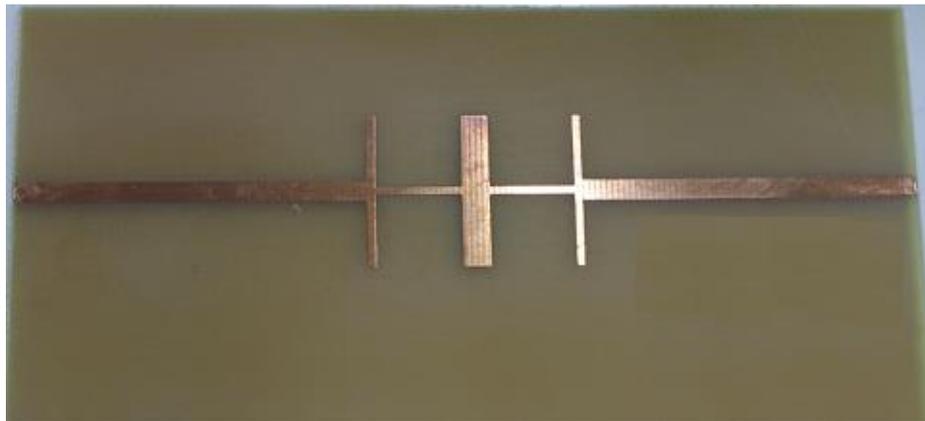
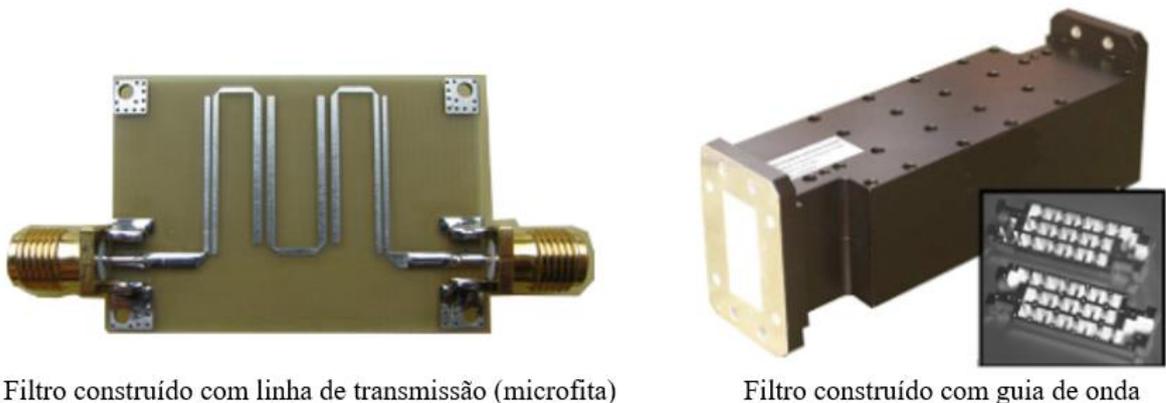


Figura 19 – Filtro construído com componentes distribuídos.

2.5 Filtros de micro-ondas

Os filtros de micro-ondas (RF) são dispositivos passivos, analógicos e produzidos com componentes distribuídos, especialmente linhas de transmissão ou guias de onda, Figura 20. Esses filtros recebem tal nomenclatura porque são aplicados na faixa de micro-ondas, cujos comprimentos de onda variam de 1 m (0,3 GHz de frequência) até 1,0 mm (300 GHz) [28].



Filtro construído com linha de transmissão (microfita)

Filtro construído com guia de onda

Figura 20 – Filtros de micro-ondas [29], [30].

Convencionalmente, as micro-ondas abrangem as faixas *Ultra High Frequency* (UHF), *Super High Frequency* (SHF) e *Extremely High Frequency* (EHF) [28]. Rádio e televisão,

telefonia móvel celular, Wi-Fi e *bluetooth* são algumas das aplicações mais conhecidas em UHF, que abrange a faixa de 300 MHz até 3 GHz. Radares, comunicação via satélite, links de retransmissão por rádio e de dados são aplicações comuns na faixa SHF, que compreende a faixa entre 3 e 30 GHz. Na faixa EHF, 30 GHz até 300 GHz, há muita disponibilidade de espectro radioelétrico, inclusive para novas pesquisas e aplicações, especialmente pela alta capacidade de transmissão de dados, como no padrão IEEE 802.11af, super Wi-Fi, operando na faixa de 60 GHz [28], [31].

Observa-se que, no caso dos filtros de micro-ondas, há inúmeras aplicações e condições nas quais esses dispositivos são utilizados, resultando em melhorias da informação trafegada, desde sistemas antigos e robustos como o rádio, até sistemas mais sensíveis como a comunicação via satélite.

Entre os filtros de micro-ondas, destacam-se os que são construídos com linhas de transmissão planares, incluindo os de microfita. Objeto de estudo e investigação desta dissertação, a microfita, incluindo os ressonadores produzidos com esse tipo de material, terão suas principais características abordadas a seguir.

2.6 A microfita

A microfita, Figura 21, é constituída por uma fita condutora uniforme, com espessura t e largura W , disposta sobre uma lâmina dielétrica de alta qualidade, limitada por um plano de terra [1], [9].

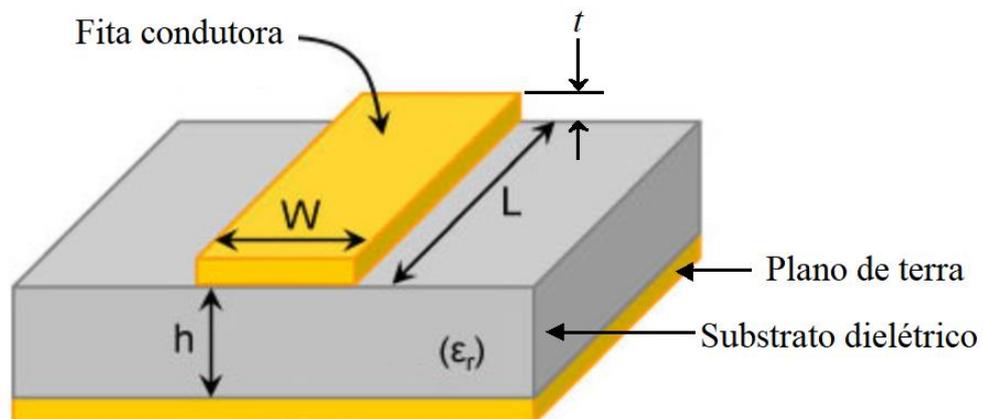


Figura 21 – Constituição básica de uma microfita, adaptado de [32].

São diversos os materiais utilizados na fabricação da microfita, muitos deles puros e outros compostos. Na seleção de determinado laminado, devem ser levados em consideração certos parâmetros importantes, quais sejam: constante dielétrica, fator de perda, homogeneidade, isotropia e uniformidade, faixa de temperatura de operação, estabilidade do

material, variações geométricas quando expostos à mudança de temperatura, umidade e técnica de fabricação (fresas, lasers, etc.), além da tolerância aos possíveis agentes químicos (percloro de ferro e outros) utilizados nos processos de confecção de circuitos [1]. Entre os materiais mais utilizados na lâmina dielétrica, destacam-se a fibra de vidro/epóxi (FR4), PTFE e alumina.

Na faixa de frequência de micro-ondas até 10 GHz, pode-se desprezar a espessura t da fita, pois esse parâmetro não afeta de forma significativa os resultados dos circuitos, com isso a análise dos projetos é simplificada [1], [9], [22].

No caso da microfita, os campos elétrico e magnético não ficam concentrados apenas na região abaixo da fita condutora, mas se distribuem em toda a região dielétrica, com a propagação de ondas ocorrendo ao longo da estrutura da fita [1], [9], [22].

Além do comportamento dos campos elétrico e magnético na microfita, aspectos importantes como a constante dielétrica efetiva, velocidade de propagação de onda (V_p) e impedância, possuem relação direta com parâmetros construtivos (W , h , ϵ_r) e com a frequência de operação desejada.

Dessa forma, alterações geométricas realizadas ao longo da linha de microfita resultam em comportamentos semelhantes ao encontrados em capacitores, indutores ou até mesmo em circuitos equivalentes, ressonando em determinadas frequências [1], [10].

Em uma aproximação usual, ϵ_{ref} corresponde ao valor da constante dielétrica efetiva para o caso quase-estático, considerando a largura da fita, que pode ser calculada utilizando aplicativos como o AppCAD [33], Figura 22, ou aplicando diretamente (7)–(10), apresentadas em [11]:

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{u}\right)^{-ab} \quad (7)$$

$$u = \frac{W}{h} \quad (8)$$

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left(\frac{u^4 + \left(\frac{u}{52}\right)^2}{u^4 + 0,432} \right) + \frac{1}{18,7} \ln \left(1 + \left(\frac{u}{18,1}\right)^3 \right) \quad (9)$$

$$b = 0,564 \left(\frac{\epsilon_r - 0,9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0,053} \quad (10)$$

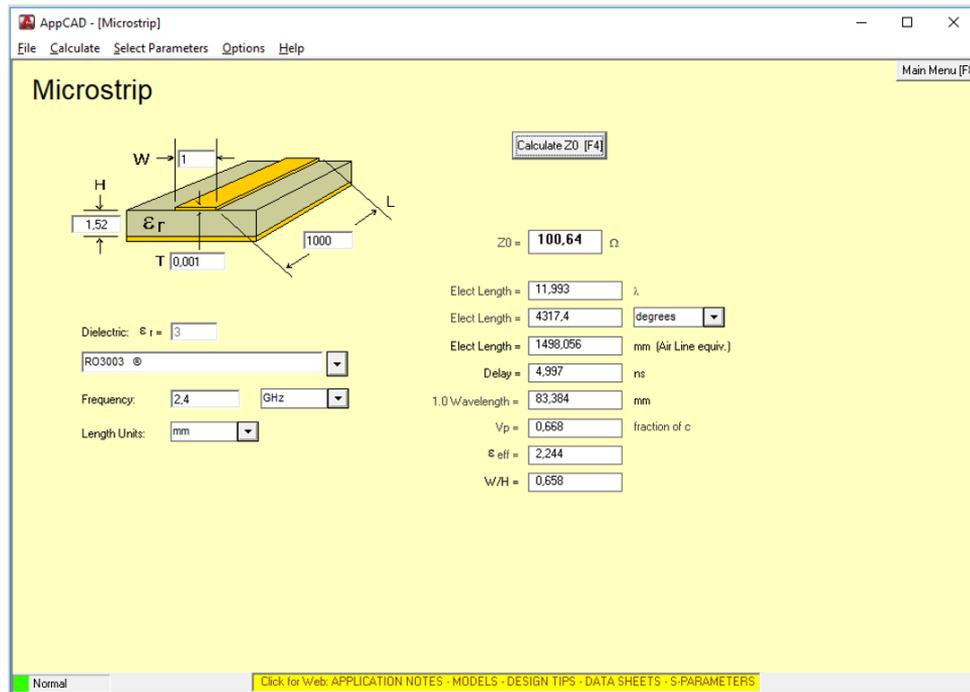


Figura 22 – Tela do aplicativo AppCAD [33].

Dependendo da aplicação e parâmetros desejados, vários tipos de ressonadores podem ser adotados.

2.6.1 Ressonadores em microfita

Os ressonadores em microfita são produzidos com diversas geometrias, sendo assim, a escolha de uma determinada geometria está associada ao tipo de filtro, técnica de fabricação disponível e outras características desejadas.

A Figura 23 apresenta tocos (*stubs*) que correspondem ao funcionamento de um capacitor ou indutor. Dependendo da configuração (em aberto ou aterrado), a mesma geometria se comporta como um ressonador diferente.

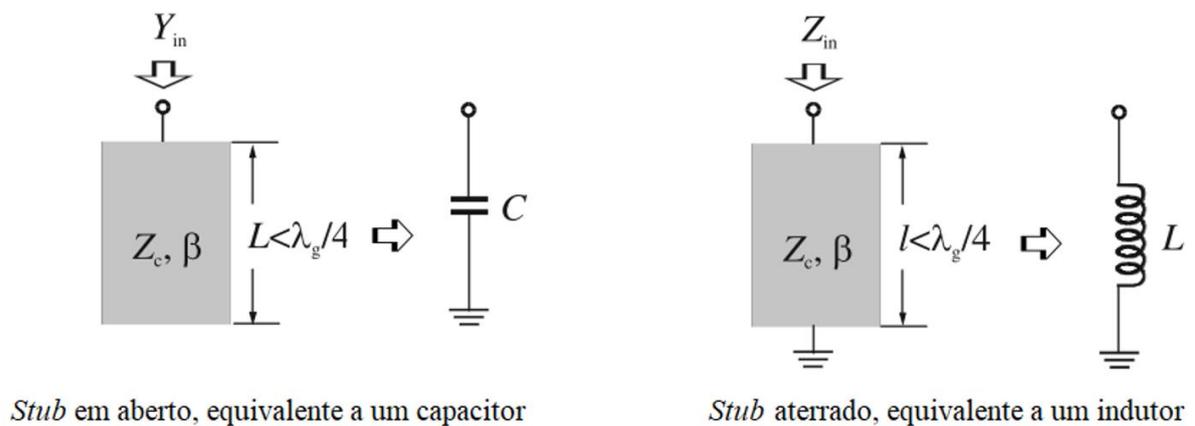


Figura 23 – Utilização de *stubs* (tocos) para obtenção de capacitores ou indutores [9].

Assim como nos tocos, a utilização de descontinuidades na linha de microfita resulta em diferentes comportamentos da propagação do sinal. Alguns exemplos de ressonadores obtidos por meio de descontinuidades, bem como seus circuitos equivalentes são apresentados na Figura 24.

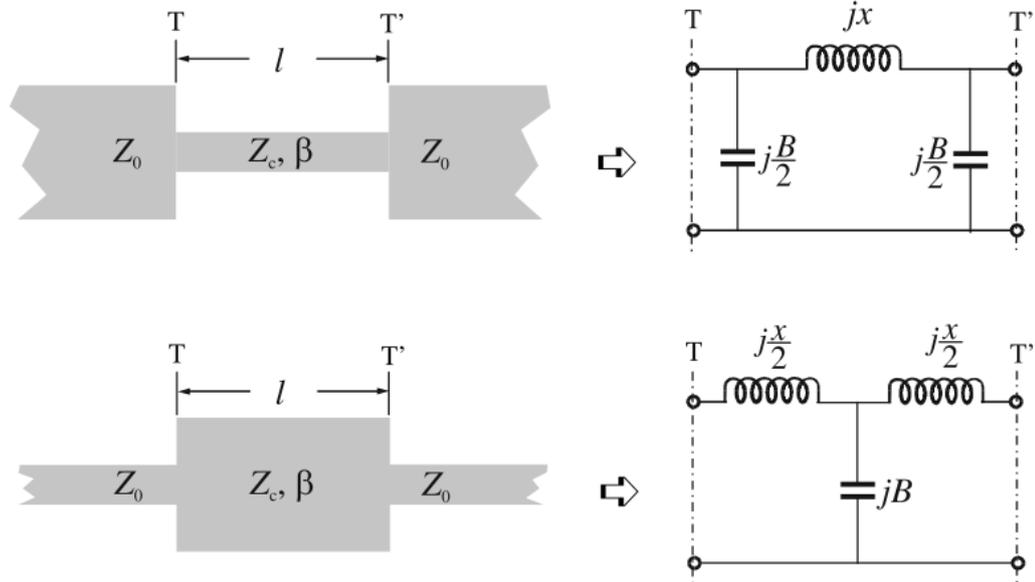


Figura 24 – Exemplos da utilização de descontinuidades e seus circuitos equivalentes [9].

De forma geral, os ressonadores em microfita são classificados em concentrados, quase concentrados, em linha e em patch. [9], [10]. Na Figura 25 são mostrados alguns tipos de ressonadores bastante utilizados.

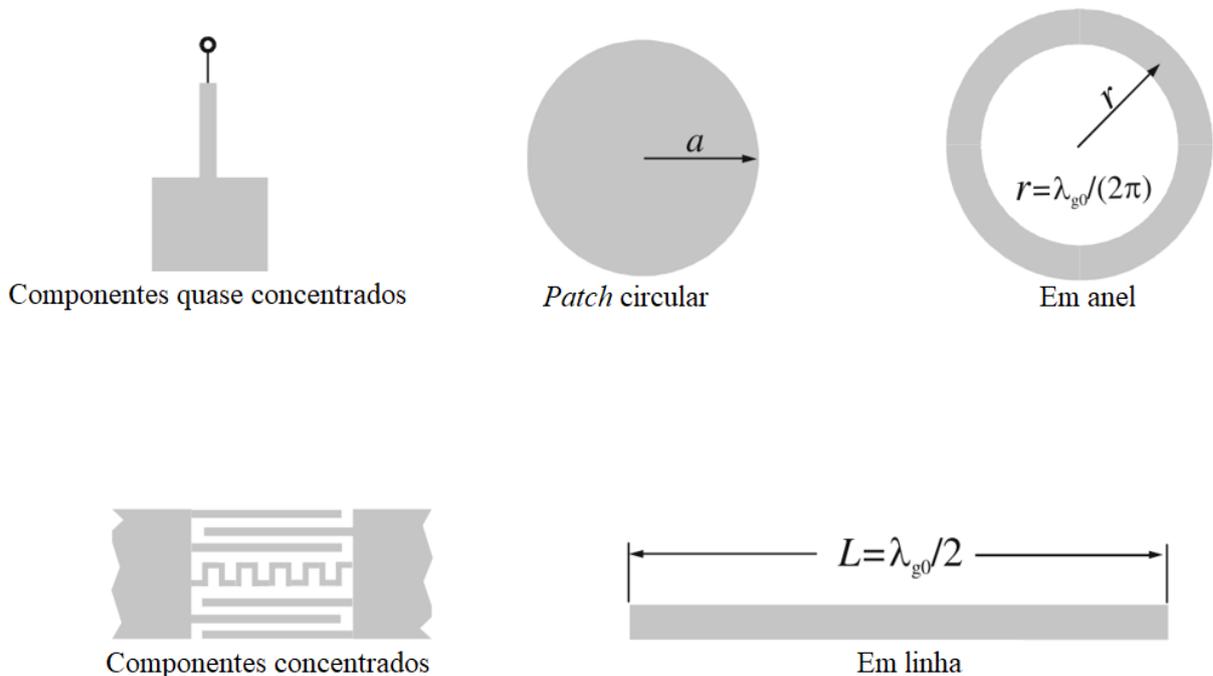


Figura 25 – Exemplos de ressonadores produzidos em microfita [9].

Filtros baseados em ressonadores que utilizam linhas de microfita são muito empregados na faixa de frequência de micro-ondas. Apesar de sua ampla utilização, esses dispositivos apresentam algumas desvantagens, por exemplo, elevadas perdas de inserção e um fator de qualidade menor (se comparados aos ressonadores dielétricos ou aos filtros em guia de ondas). Mesmo diante de tais limitações, os filtros planares são escolhidos pela facilidade de fabricação, diversidade de aplicações e possibilidade de integração diretamente com circuitos ativos [9], [10].

Os projetos nessas faixas buscam desenvolver dispositivos cujas dimensões e peso sejam os mais reduzidos possíveis. Diante dessa necessidade, preferencialmente se adota a tecnologia planar, desde que seja viável a sua utilização.

Ferramentas que possibilitam o projeto assistido por computador – CAD (do inglês, *Computer-Aided Design*), por exemplo, o ANSYS Designer na área de telecomunicações, facilitam a realização de projetos e proporcionam novas configurações com variadas formas geométricas.

No caso da microfita, a versatilidade obtida com o uso do ANSYS Designer foi fundamental para os projetos desenvolvidos no GTEMA, assim como no desenvolvimento do presente trabalho.

Como mencionado anteriormente, as primeiras aplicações que se inspiraram nas matrioskas foram aplicadas às FSS, mas se adaptaram aos filtros, especialmente pela característica marcante da miniaturização.

No próximo capítulo serão apresentadas características básicas dos filtros matrioska, pois essas informações são fundamentais para a continuidade do trabalho.

3 GEOMETRIA MATRIOSKA

O crescente número de usuários e os novos serviços oferecidos resultam em uma ocupação muito elevada de diversas faixas de frequências. Dessa forma, novos requisitos operacionais são buscados, especialmente os relacionados à resposta em frequência, destacando-se a largura de banda e seletividade.

Não menos importantes do que os parâmetros já mencionados, a miniaturização, peso e custos reduzidos, ganham destaque num ambiente de convergência digital, resultando em desafios para os projetistas da área de micro-ondas e, conseqüentemente, alavancam a pesquisa de novas configurações e uma melhor compreensão do funcionamento dessas estruturas [9], [10], [19].

Neste trabalho, propõe-se a construção de filtros utilizando-se a geometria matrioska com anéis retangulares e circulares em uma estrutura planar do tipo microfita, com um substrato dielétrico de espessura h e constante dielétrica ϵ_r . Como definido no Capítulo 2, ϵ_{ref} corresponde ao valor da constante dielétrica efetiva para o caso quase-estático, calculada por meio da equação (7), considerando-se a largura da fita.

3.1 Geometria matrioska com anéis retangulares

A geometria é baseada em anéis retangulares com alimentação simétrica, pois essa delimitação facilita a análise dos dados. Como ponto inicial, considera-se um anel quadrado, aberto com uma fenda de dimensão g , alimentado por duas linhas simétricas, Figura 26.

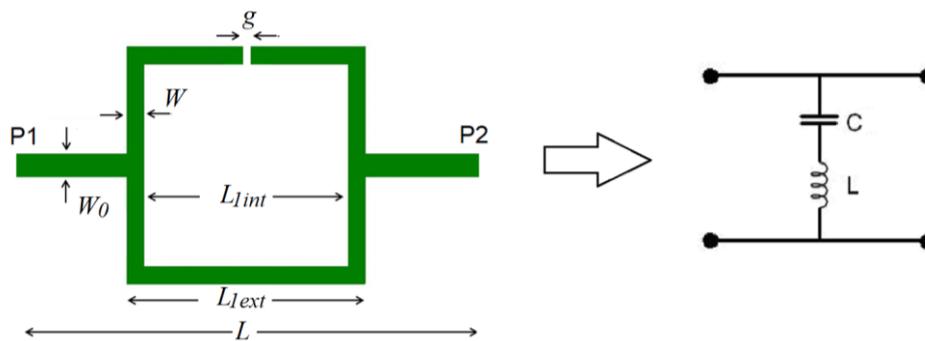


Figura 26 – Filtro rejeita-faixa (ressonador em forma de C) e seu circuito equivalente [12].

Conhecido como ressonador em forma de C [34], esse dispositivo corresponde a um filtro rejeita-faixa, cuja frequência de ressonância é dada por:

$$f_{res}(GHz) = \frac{0,3}{L_{ef}\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (11)$$

Em que L_{ef} é o comprimento efetivo do anel, dado por:

$$L_{ef} = 4 \times L_{1méd} - g \quad (12)$$

Sendo $L_{1méd}$ o valor médio dos comprimentos externo e interno do anel:

$$L_{1méd} = \frac{(L_{1ext} + L_{1int})}{2} \quad (13)$$

O Filtro rejeita-faixa concebido com um ressonador em forma de C tem sua resposta em frequência relacionada a um comprimento de onda ($L_{ef} \approx \lambda_g$).

No caso de filtros que utilizam a forma geométrica matrioska, Figura 27, a variação de parâmetros como o número de anéis, suas dimensões e espaçamento entre eles, são alguns dos recursos utilizados para obtenção de determinada resposta em frequência, mantendo-se ainda a área ocupada pelo anel mais externo.

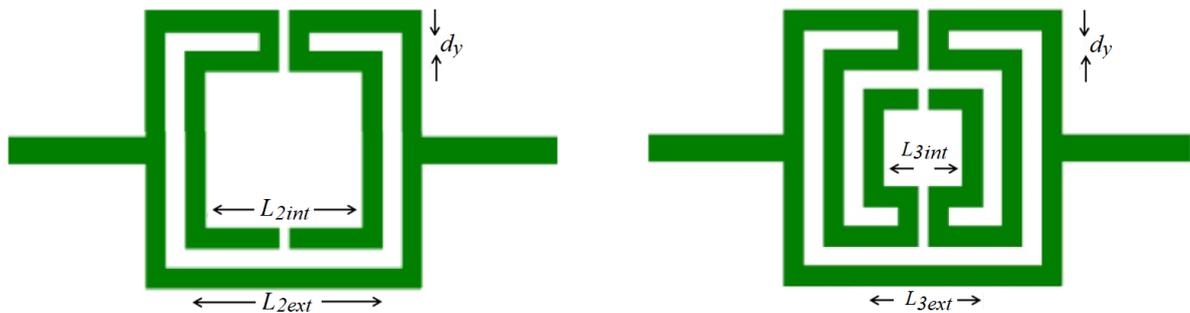


Figura 27 – Ressonadores matrioska com dois e três anéis retangulares.

Ocorre que, com o aumento do número de anéis, o circuito equivalente não é tão simples, pois começam a ocorrer acoplamentos entre os anéis e, as expressões para a frequência de ressonância não se mostram tão precisas.

As equações iniciais de projeto são um primeiro passo para o estabelecimento das dimensões dos filtros. A partir dessas equações, os filtros são simulados numericamente por diversas vezes, com pequenos ajustes manuais na geometria, até a obtenção das características desejadas. Para o caso da geometria matrioska com dois anéis, são apresentadas as seguintes equações, baseadas em trabalhos anteriores [11], [12]:

$$f_{ri}(GHz) = \frac{0,3}{2L_{ief}\sqrt{\epsilon_{ref}}}, \quad i = 1,2 \quad (14)$$

$$L_{ef1} = 3 \times L_{1int} + 3 \times L_{2int} + dy \quad (15)$$

$$L_{ef2} = 3 \times L_{1int} + L_{2int} \quad (16)$$

Estabelecendo-se as mesmas condições, são propostas expressões aproximadas para a geometria matrioska com 3 anéis. Para a primeira ressonância, o comprimento efetivo, L_{ef1} , é dado por:

$$L_{ef1} = 3 \times (L_{1int} + L_{2int} + L_{3int}) + 2 \times dy \quad (17)$$

No caso da segunda frequência de ressonância, o comprimento efetivo, L_{ef2} , é dado por:

$$L_{ef2} = 3 \times (L_{1int} + L_{2int}) + 2 \times L_{3int} \quad (18)$$

Os filtros rejeita-faixa concebidos com dois ou três ressonadores matrioska tem sua resposta em frequência relacionada a meio comprimento de onda ($L_{ef} \approx \lambda_g/2$).

Convém ressaltar que as equações apresentadas são aproximações, importantes no início do projeto, pois facilitam o uso de otimizações numéricas, realizadas posteriormente com o uso de *software*.

Concluindo a caracterização da geometria matrioska, destaca-se que a resposta em frequência típica dos filtros com dois anéis, Figura 28, possui uma reduzida faixa de transição, duas frequências de ressonância (f_{r1} e f_{r2}) que podem ser calculadas com (14) e uma crista indesejada que reduz sua atenuação livre.

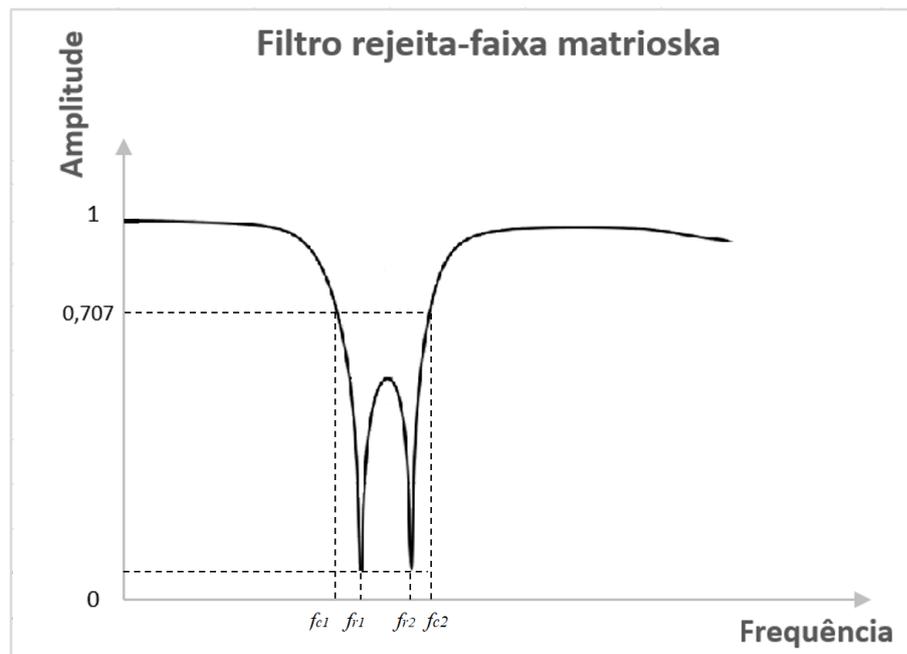


Figura 28 – Resposta em frequência de filtros matrioska com dois anéis retangulares

3.2 Geometria matrioska com anéis circulares

De modo semelhante à geometria matrioska com anéis retangulares, a caracterização matrioska com anéis circulares considera, inicialmente, um ressonador com um anel de largura W , aberto com uma fenda de dimensão g , alimentado por duas fitas simétricas, como visto na Figura 29.

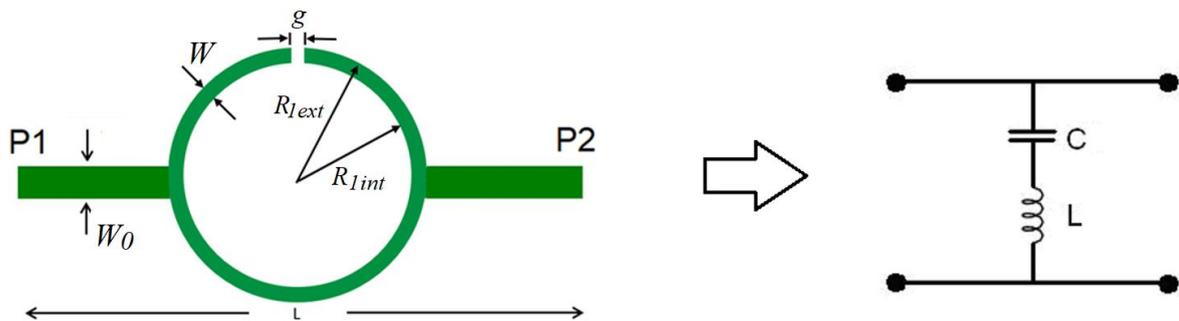


Figura 29 – Filtro rejeita-faixa (ressonador em forma de C) e seu circuito equivalente.

Também conhecido como ressonador em forma de C, esse filtro rejeita-faixa tem sua frequência de ressonância calculada do seguinte modo:

$$f_{res}(GHz) = \frac{0,3}{L_{ef}\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (19)$$

Em que L_{ef} é o comprimento efetivo do anel, dado por:

$$L_{ef} = 2\pi R_{1médio} \quad (20)$$

Sendo $R_{1médio}$ o valor médio dos raios externo e interno do anel:

$$R_{1médio} = \frac{(R_{1ext} + R_{1int})}{2} \quad (21)$$

Para filtros com dois ou mais anéis matrioska circulares, Figura 30, a variação de parâmetros como o espaçamento entre os anéis, raio dos anéis internos e largura da fita do anel, entre outros, permitem várias configurações diferentes.

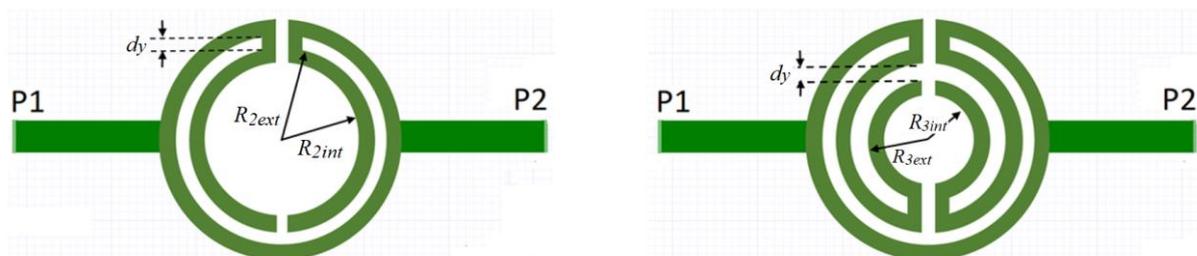


Figura 30 – Ressonadores matrioska com dois e três anéis circulares.

Todavia, o aumento do número de anéis circulares resulta nos mesmos problemas verificados no uso de anéis retangulares (acoplamentos indesejados e menor precisão das equações utilizadas). Seguindo o mesmo padrão utilizado, a largura da fita dos anéis, W , será a mesma, assim como o espaçamento entre os anéis, d_y . Nos ressonadores que utilizam dois anéis matrioska, as duas primeiras frequências de ressonância podem ser obtidas por:

$$f_{ri}(GHz) = \frac{0,3}{2L_{ief}\sqrt{\epsilon_{ref}}}, \quad i = 1,2 \quad (22)$$

Sendo que L_{1ef} e L_{2ef} correspondem a:

$$L_{1ef} = 2\pi \left(R_{1int} + \frac{R_{2int}}{2} \right) - d_y \quad (23)$$

$$L_{2ef} = 2\pi \left(R_{1int} + \frac{R_{2int}}{4} \right) - 2d_y \quad (24)$$

No caso do filtro com três anéis, as duas primeiras ressonâncias podem ser calculadas utilizando-se a equação (22), contudo o comprimento efetivo será calculado por:

$$L_{1ef} = 2\pi \left(R_{1int} + \frac{R_{2int}}{2} + \frac{R_{3int}}{2} \right) - 2d_y \quad (25)$$

$$L_{2ef} = 2\pi \left(R_{1int} + \frac{R_{2int}}{2} + \frac{R_{3int}}{4} \right) - 2d_y \quad (26)$$

De modo análogo aos filtros matrioska com anéis retangulares, o desenvolvimento de filtros matrioska com anéis circulares é baseado em equações aproximadas, com certas limitações, mas igualmente importantes para o início do projeto. Essas equações representam uma inovação em relação aos trabalhos anteriores, pois até o momento só eram considerados anéis retangulares.

A resposta em frequência típica dos filtros matrioska com dois anéis circulares possui comportamento semelhante aos filtros com anéis retangulares, Figura 28 (reduzida faixa de transição, duas frequências de ressonância e uma crista indesejada que reduz sua atenuação livre).

4 RESULTADOS OBTIDOS

As simulações numéricas possuem papel fundamental no projeto, pois constituem a primeira etapa de utilização das equações iniciais disponíveis. Além disso, as simulações facilitam o trabalho do projetista, pois as alterações realizadas na geometria são rapidamente analisadas de forma numérica, resultando em uma análise paramétrica dinâmica e eficiente.

Por meio de simulações realizadas no ANSYS Designer 8.0 [35], foi possível avaliar o comportamento dos filtros propostos, especialmente os principais parâmetros de interesse, destacando-se inicialmente a frequência de ressonância e largura de banda.

Neste trabalho, foram projetados quatro filtros baseados na geometria matrioska de anéis retangulares, aplicados à faixa Wi-Fi (faixa de 2,4 GHz), e nove filtros baseados na geometria matrioska de anéis circulares. A Tabela 1 contempla as especificações adotadas em todas as simulações, incluindo os valores característicos do substrato RO3003 [36], material utilizado na fabricação dos dispositivos.

Tabela 1 – Especificações utilizadas em todas as simulações.

Especificação	Valor utilizado
Espessura do substrato RO3003	1,52 mm
Constante dielétrica ϵ_r do substrato RO3003	3,0
Tangente de perdas do substrato RO3003	0,001
Impedância característica da linha de transmissão (Portas 1 e 2)	50 Ω
Largura da fita na linha de transmissão (w_0), portas 1 e 2	3,8 mm
Largura da fita dos anéis (w)	1,0 mm
Distância entre as portas 1 e 2	60 mm

Abre-se um parêntese para destacar que a utilização do substrato RO3003, da Rogers Corporation, ocorreu pela disponibilidade desse material no GTEMA e pelas suas características de operação, em especial a estabilidade da constante dielétrica em várias temperaturas e frequências.

Como visto no Capítulo 3, os filtros planares baseados na geometria matrioska com anéis circulares possuem comportamento semelhante aos filtros baseados na geometria matrioska com anéis retangulares. Dessa forma, considerando a resposta em frequência típica para ambas configurações (dois anéis retangulares ou circulares), Figura 31, as simulações devem ponderar alguns parâmetros básicos de operação.

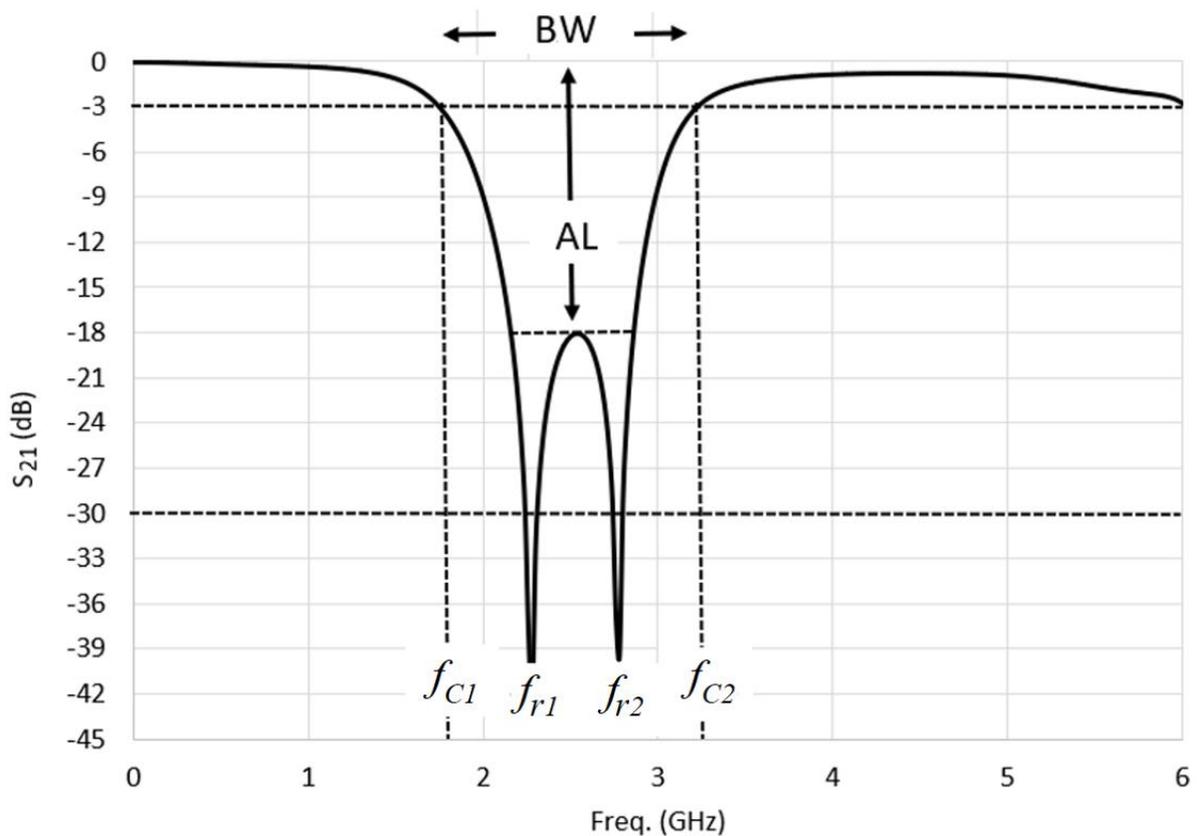


Figura 31 – Resposta em frequência típica de um ressonador matrioska com dois anéis.

Esses parâmetros de operação, em geral, estão relacionados à faixa de frequência e sensibilidade desejadas. Em sintonia com as características dos filtros baseados na geometria matrioska, serão adotados os seguintes parâmetros:

- ✓ Frequências de ressonância, f_{r1} e f_{r2} ;
- ✓ Frequências de corte em -3 dB, f_{c1} e f_{c2} ;
- ✓ Frequência central da faixa de ressonância, $f_{r\text{média}} = \frac{f_{r1} + f_{r2}}{2}$;
- ✓ Largura de banda definida em -3 dB (meia potência);
- ✓ Atenuação livre, AL; e
- ✓ Faixa de transição de -3 dB a -30 dB.

Feitas as considerações iniciais sobre as simulações, bem como especificações e parâmetros adotados no presente trabalho, serão apresentados a seguir os resultados numéricos e experimentais de filtros planares baseados na geometria matrioska com anéis retangulares e circulares.

4.1 Geometria matrioska com anéis retangulares: resultados numéricos e experimentais

O primeiro filtro projetado é um ressonador em forma de C, rejeita-faixa, concebido com alimentação simétrica, $L_{ext}=22,0$ mm, com frequência de ressonância em 2,45 GHz, o que corresponde a uma área ocupada de $0,180\lambda_0 \times 0,180\lambda_0$, sendo λ_0 o comprimento de onda no espaço livre, na frequência de projeto. Os demais filtros projetados foram baseados na geometria matrioska com anéis retangulares, e seus resultados foram comparados com os resultados obtidos no primeiro filtro, obtendo-se ao final, as seguintes estruturas:

- 1) Filtro rejeita-faixa, ressonador em forma de C – Filtro 1;
- 2) Filtro rejeita-faixa, matrioska, com dois anéis quadrados – Filtro 2;
- 3) Filtro rejeita-faixa, matrioska, com dois ressonadores em série, simétricos, cada um com dois anéis quadrados – Filtro 3; e
- 4) Filtro rejeita-faixa, matrioska, com dois anéis retangulares, cuja dimensão ocupa praticamente a mesma largura da linha de alimentação – Filtro 4.

Utilizando as equações aproximadas, os resultados numéricos foram obtidos por meio do ANSYS Designer 8.0, sendo possível a construção de filtros idealizados para a faixa de operação em 2,4 GHz.

Valendo-se mais uma vez dessa ferramenta computacional, foram obtidos os leiautes em *Drawing Exchange Format* (dxf), que garantiram a confecção de adesivos plásticos utilizados na fabricação dos filtros. Essa etapa consistiu basicamente no corte e limpeza das placas condutoras e fixação dos adesivos de cada filtro projetado, Figura 32.

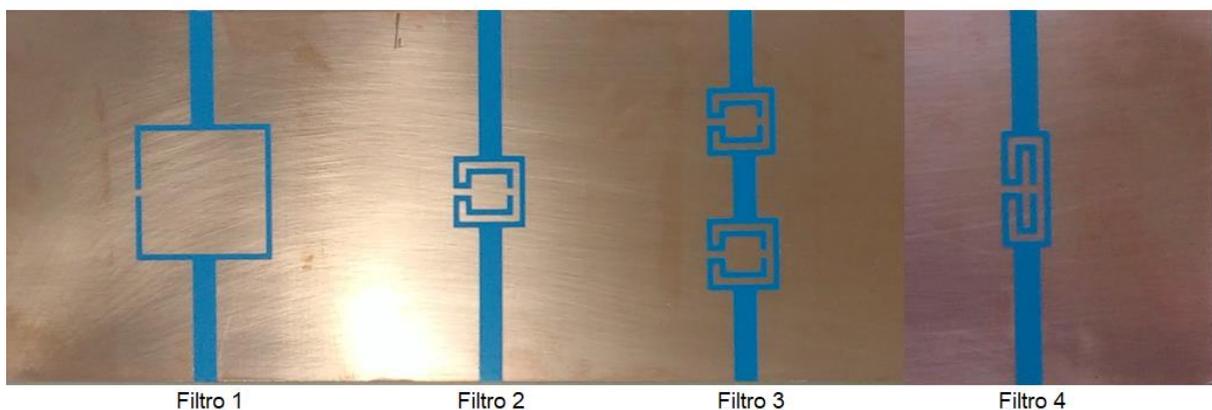


Figura 32 – Placas condutoras após processo de limpeza e colagem de adesivos

Em seguida, as placas adesivadas foram colocadas em solução à base de percloroeto de ferro, resultando na corrosão de áreas livres de adesivos, obtendo-se os circuitos impressos

projetados, finalizando assim, o processo de construção de cada dispositivo, destacando-se na Figura 33, os quatro filtros detalhados nesse momento.

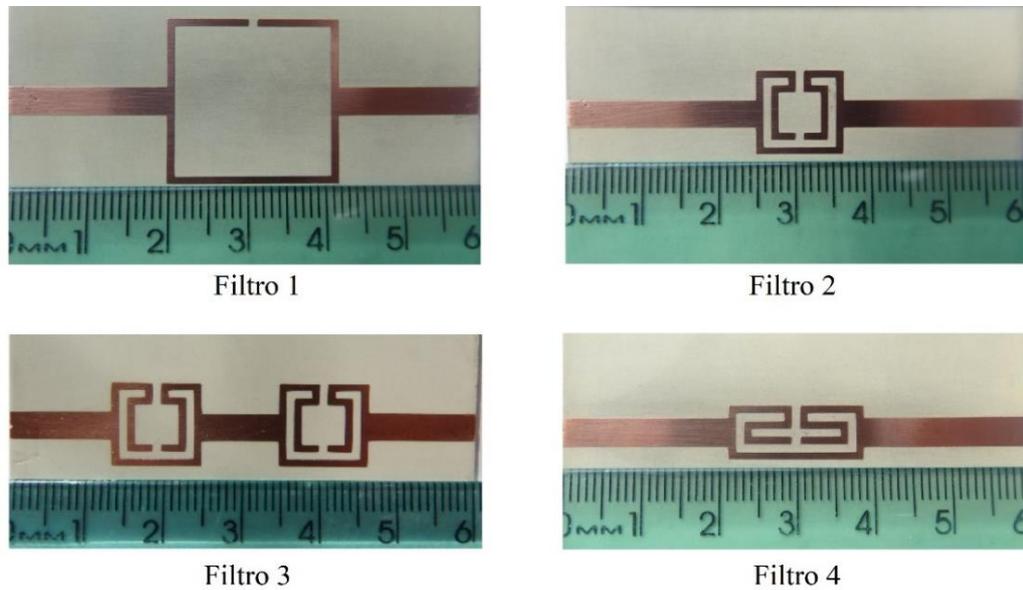


Figura 33 – Filtros 1 a 4, fabricados com anéis retangulares.

As medições foram realizadas no Laboratório de Medidas em Telecomunicações, do IFPB, utilizando um analisador de redes Agilent E5071C [37], Figura 34, obtendo-se, para cada dispositivo, o parâmetro S_{21} , equivalente ao coeficiente de transmissão para as faixas de frequências analisadas, de 0 a 6 GHz.

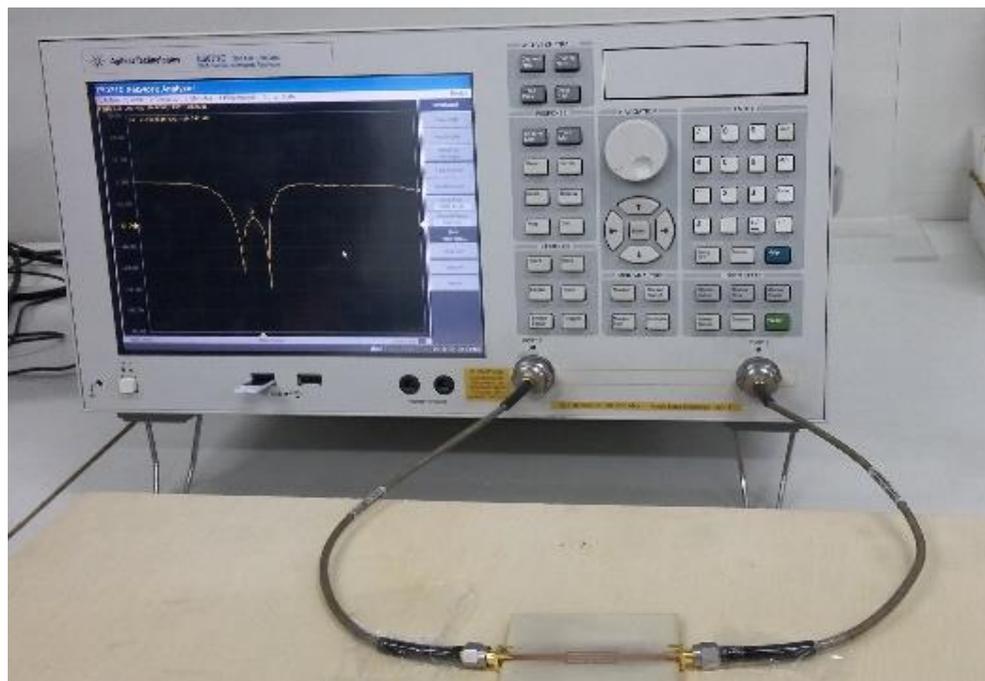


Figura 34 – Configuração utilizada na caracterização experimental.

4.1.1 Filtro com um ressonador em forma de C

A resposta em frequência, $S_{21}(\text{dB}) \times \text{frequência (GHz)}$ do filtro 1, um ressonador em forma de C, com $L_{1ext} = 22,0$ mm, é apresentada na Figura 35. Quando comparados aos resultados numéricos, os resultados experimentais apresentaram uma ótima concordância, ficando a frequência de ressonância medida, 2,461 GHz, muito próxima do valor calculado com a equação (11), qual seja, 2,412 GHz (uma diferença de aproximadamente 2%).

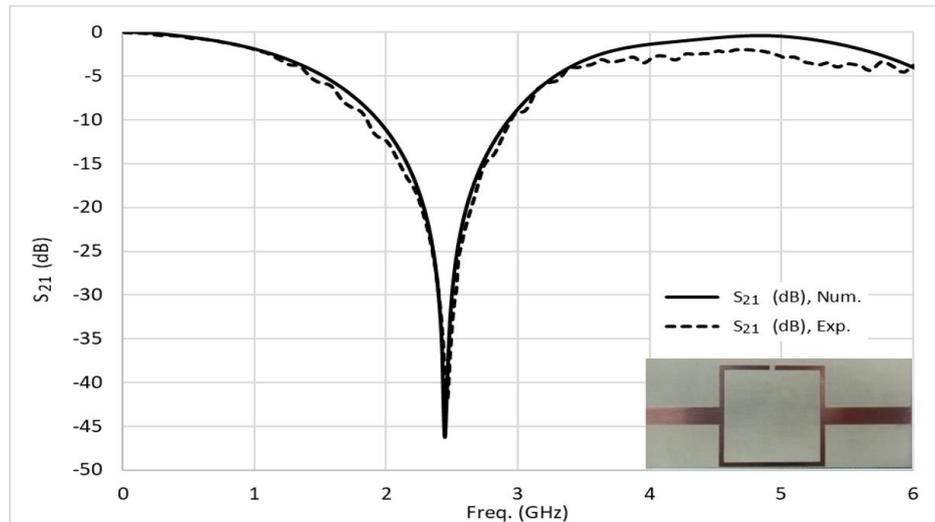


Figura 35 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz) para o ressonador em C, filtro 1.

Os principais parâmetros avaliados e seus respectivos valores experimentais compõem a Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados experimentais do filtro 1.

Parâmetro	Valor obtido
f_{c1} (GHz)	1,171
f_{c2} (GHz)	3,821
f_{r1} (GHz)	2,461
Faixa de transição 1 (GHz)	1,230
Faixa de transição 2 (GHz)	1,301
Largura de banda (GHz)	2,650
AL(dB)	42,15
Área ocupada	$0,0324\lambda_0^2$

4.1.2 Filtro com dois anéis quadrados

Com a utilização da geometria matrioska no filtro 2, construído com dois anéis quadrados, com valores de $L_{1ext} = 11,6$ mm, $L_{2ext} = 7,6$ mm e $d_y = 1,0$ mm, foi possível reduzir

as dimensões do dispositivo para $0,095\lambda_0 \times 0,095\lambda_0$, ou seja, $0,0090\lambda_0^2$. A resposta em frequência, S_{21} (dB) \times frequência (GHz) do filtro 2 é apresentada na Figura 36, já os parâmetros avaliados estão resumidos na Tabela 3.

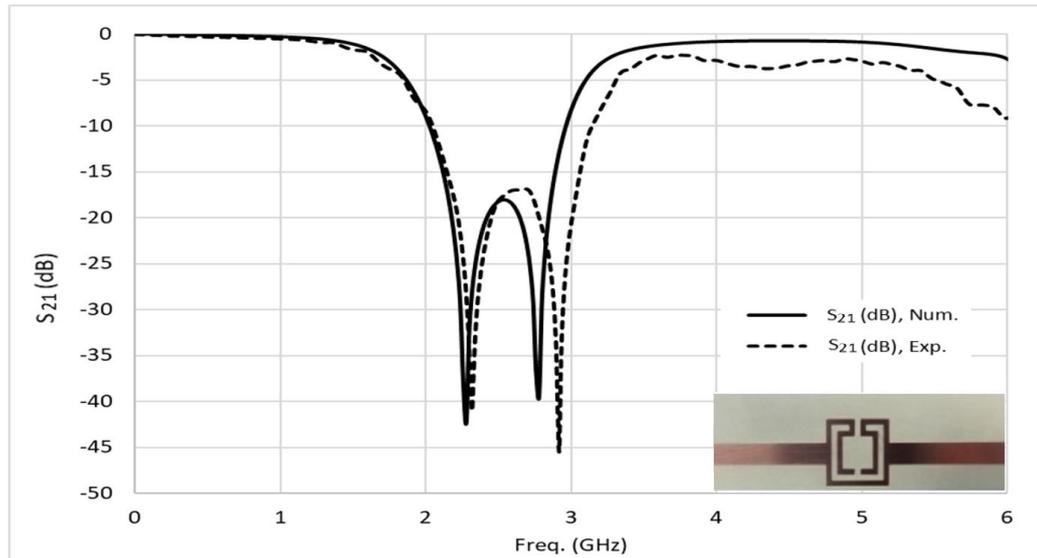


Figura 36 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para o ressonador matrioska, filtro 2.

Numa análise comparativa com o ressonador em forma de C, filtro 1, o filtro rejeita-faixa fabricado com um ressonador matrioska com dois anéis, filtro 2, destaca-se com os seguintes pontos positivos: redução da área ocupada em cerca de 72% e maior seletividade, pois tem uma largura de banda 32% menor, e sua faixa de transição apresenta um decréscimo de mais de 50%.

Dependendo da aplicação, um ponto que pode ser considerado negativo no filtro 2 é a redução da atenuação livre, pois esse parâmetro teve seu valor reduzido em mais de 25 dB, se comparado ao filtro 1, caindo de 42,15 dB para 16,87 dB.

Tabela 3 – Resultados experimentais do filtro 2.

Parâmetro	Valor obtido
f_{c1} (GHz)	1,681
f_{c2} (GHz)	3,480
f_{r1} (GHz)	2,321
f_{r2} (GHz)	2,931
Faixa de Transição 1 (GHz)	0,610
Faixa de Transição 2 (GHz)	0,535
Largura de banda (GHz)	1,799
AL(dB)	16,87
Área ocupada	$0,0090\lambda_0^2$

Os resultados obtidos com as equações iniciais de projeto foram considerados satisfatórios. Os valores das duas frequências de ressonância calculados com a equação (14), $fr_1=2,148$ GHz e $fr_2=2,910$ GHz, quando comparados aos resultados medidos, apresentam diferença de 7,46% e 0,73%, respectivamente, ou seja, são suficientemente próximas para uma estimativa inicial desse tipo de trabalho.

4.1.3 Filtro com dois ressonadores em série

O terceiro filtro selecionado foi projetado e fabricado com dois ressonadores em cascata (série), observando-se que cada um dos ressonadores é idêntico ao utilizado no filtro 2, ou seja, são simétricos, cada um com dois anéis quadrados com valores de $L_{1ext} = 11,6$ mm, $L_{2ext} = 7,6$ mm e $d_y = 1,0$ mm. O espaçamento d entre os ressonadores é de 10 mm, cujo valor foi alcançado por meio de várias simulações numéricas, de maneira a se obter uma maior atenuação livre e um menor espaçamento. Sua resposta em frequência é apresentada na Figura 37.

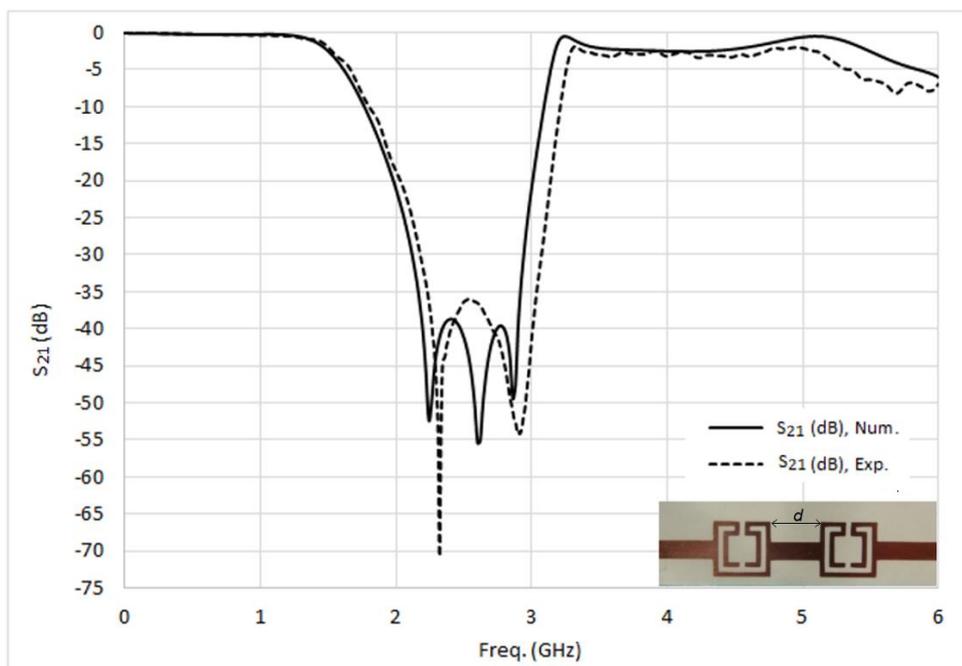


Figura 37 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para o ressonador matrioska em série, filtro 3.

Essa configuração em série, ou cascata, foi utilizada em trabalhos anteriores [11], [12] para aumentar a atenuação livre, ampliando-se, assim, o leque de aplicações desse tipo de ressonador. Dessa forma, uma análise paramétrica com o mesmo recurso foi utilizada no filtro 3, tomando-se como base os resultados obtidos no filtro 2.

Em relação ao ressonador em forma de C, o filtro 3 tem uma área ocupada de $0,272\lambda_0 \times 0,096\lambda_0$, cerca de 20% menor que a área do filtro 1. Sua largura de banda é semelhante

ao ressonador matrioska com dois anéis, filtro 2, mas a configuração em cascata conseguiu elevar a atenuação livre para 36 dB, aumentando consideravelmente as possibilidades de aplicação desse protótipo. Complementando a análise, comparando-se os filtros 2 e 3, percebe-se que a área ocupada pelo filtro 3 corresponde a 2,9 vezes a área do filtro 2. Esse valor é justificado pelo uso de dois ressonadores e pelo trecho adicional de linha de transmissão inserido entre esses ressonadores. Os principais parâmetros observados para o filtro 3 estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados experimentais do filtro 3.

Parâmetro	Valor obtido
f_{c1} (GHz)	1,551
f_{c2} (GHz)	3,281
f_{r1} (GHz)	2,321
f_{r2} (GHz)	2,911
Faixa de Transição 1 (GHz)	0,630
Faixa de Transição 2 (GHz)	0,160
Largura de banda (GHz)	1,730
AL(dB)	36,00
Área ocupada	$0,0261\lambda_0^2$

4.1.4 Filtro com dois anéis retangulares

Concluindo a lista de protótipos produzidos nessa sessão, o quarto filtro selecionado, filtro 4, foi projetado com um ressonador composto por dois anéis retangulares, com dimensões reduzidas de tal forma que praticamente fica contido na linha de transmissão do circuito. O anel externo foi dimensionado com $17,6 \text{ mm} \times 7,0 \text{ mm}$, e o anel interno com $13,6 \text{ mm} \times 3,0 \text{ mm}$, mantendo-se o valor de d_y em 1,0 mm. Essa configuração com anéis retangulares foi uma inovação interessante em relação a trabalhos anteriores [11], [12], cujas configurações eram baseadas apenas em anéis quadrados.

Verificou-se que, mesmo com a mudança da forma geométrica (quadrada para retangular), os principais diferenciais positivos do ressonador matrioska são mantidos, ou seja, é possível manter uma boa seletividade, faixa de transição reduzida e a miniaturização do dispositivo. Assim como verificado no filtro 2, a atenuação livre reduzida pode comprometer sua utilização, entretanto pode-se utilizar mais um estágio em série para alcançar valores satisfatórios para esse parâmetro, de forma análoga ao que foi realizado no filtro 3, ampliando

significativamente o leque de aplicações desse filtro *notch*.

A resposta em frequência do filtro 4, S_{21} (dB) \times frequência (GHz), é apresentada na Figura 38.

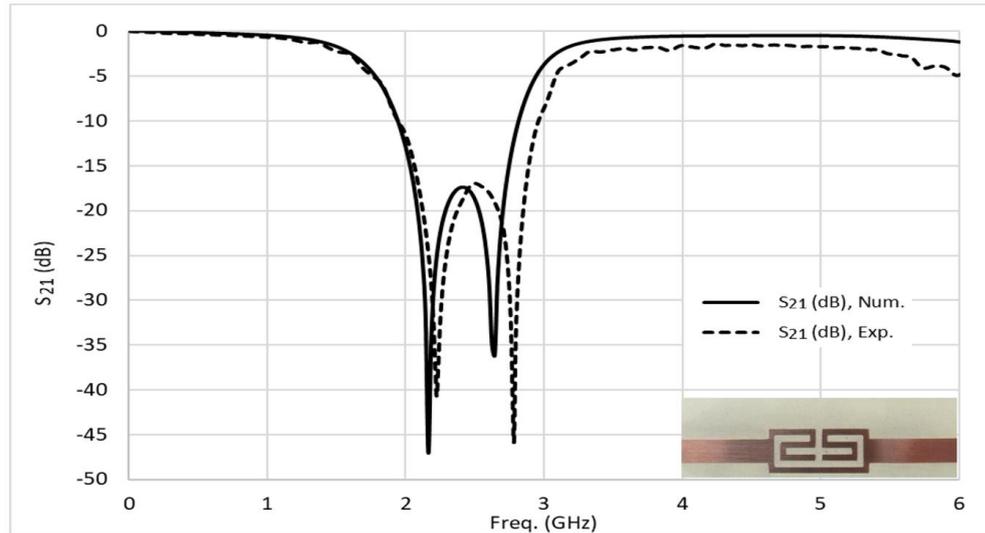


Figura 38 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para o ressonador matrioska retangular , filtro 4.

Os valores iniciais de projeto, calculados com a equação (14), cujos resultados obtidos são $f_{r1} = 2,490$ GHz e $f_{r2} = 2,691$ GHz, quando comparados aos resultados medidos, apontam uma diferença de 10,8% e 3,36%, para a primeira e a segunda frequência de ressonância, respectivamente. Os parâmetros avaliados estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados experimentais do filtro 4.

Parâmetro	Valor obtido
f_{c1} (GHz)	1,625
f_{c2} (GHz)	3,261
f_{r1} (GHz)	2,221
f_{r2} (GHz)	2,781
Faixa de Transição1 (GHz)	0,566
Faixa de Transição2 (GHz)	0,455
Largura de banda (GHz)	1,636
AL(dB)	17,00
Área ocupada	$0,0083\lambda_0^2$

Para facilitar a análise dos resultados experimentais, a Tabela 6 apresenta um quadro comparativo com os parâmetros avaliados em cada filtro construído, consolidando todo o trabalho produzido nessa seção. De forma geral, verifica-se que, quando comparados ao filtro

fabricado com um ressonador em forma de C, os outros três filtros rejeita-faixa, projetados e fabricados com ressonadores matrioska com anéis retangulares, obtiveram resultados muito interessantes de seletividade, reduzidas faixas de transição e miniaturização.

Tabela 6 – Comparação de resultados experimentais dos filtros 1 a 4.

Parâmetro	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
f_{c1} (GHz)	1,171	1,681	1,551	1,625
f_{c2} (GHz)	3,821	3,480	3,281	3,261
f_{r1} (GHz)	2,461	2,321	2,321	2,221
f_{r2} (GHz)	-	2,931	2,911	2,781
Faixa de Transição 1 (GHz)	1,230	0,610	0,630	0,566
Faixa de Transição 2 (GHz)	1,301	0,535	0,160	0,455
Largura de banda (GHz)	2,650	1,799	1,730	1,636
AL(dB)	42,15	16,87	36,00	17,00
Área ocupada	$0,0324 \lambda_0^2$	$0,0090 \lambda_0^2$	$0,0261 \lambda_0^2$	$0,0083 \lambda_0^2$

Finalizando a apresentação dos resultados experimentais dessa seção, visualiza-se em um único gráfico, Figura 39, as respostas em frequência dos filtros baseados na geometria matrioska com anéis retangulares.

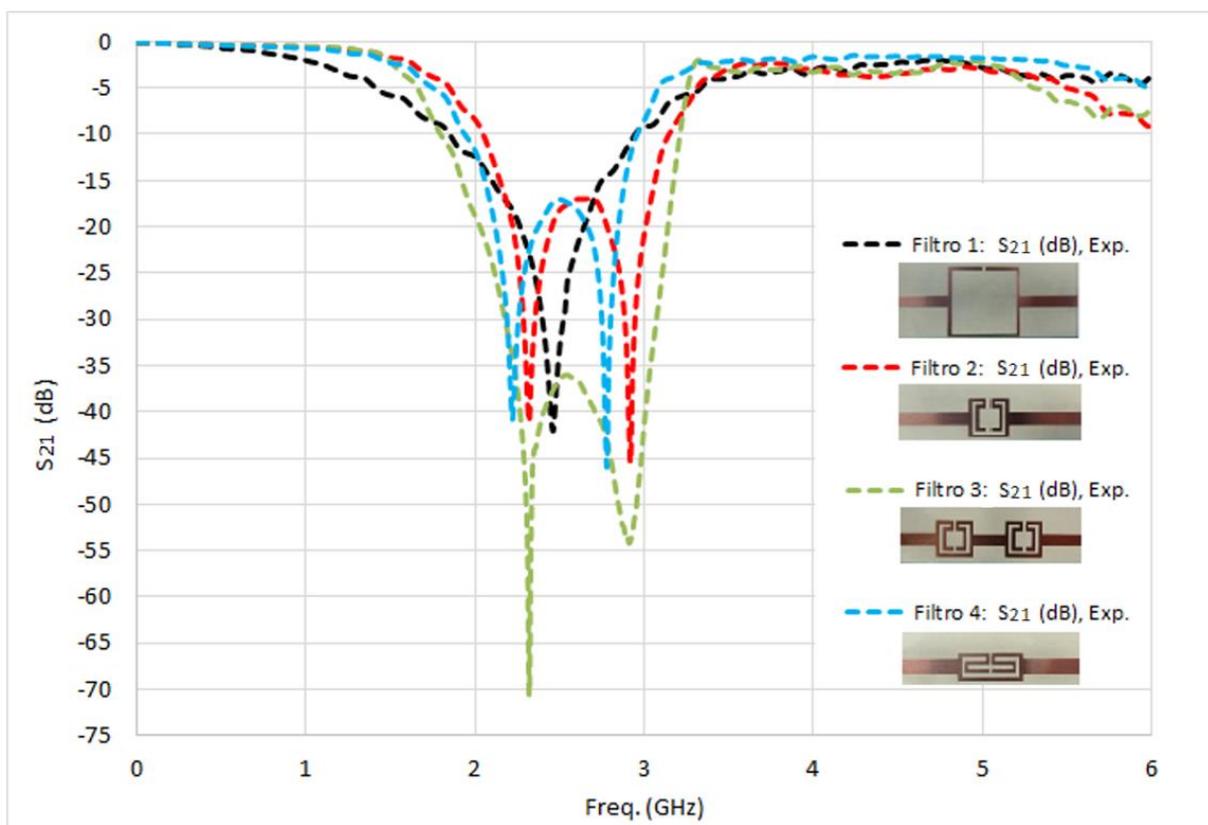


Figura 39 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para os filtros 1 a 4.

4.2 Geometria matrioska com anéis circulares: resultados numéricos e experimentais

Os processos de simulação, fabricação e medição dos filtros baseados na geometria matrioska com anéis circulares foram os mesmos adotados para os anéis retangulares. Convém destacar que neste trabalho, os filtros matrioska com anéis circulares foram projetados para operar em diversas faixas de frequência, buscando-se avaliar o comportamento dessa nova configuração de forma mais ampla, de modo semelhante aos primeiros trabalhos desenvolvidos com os filtros matrioska com anéis retangulares. Diante disso, apresentam-se a seguir os resultados numéricos e experimentais para essa nova configuração proposta.

4.2.1 Filtros com um anel circular

Em uma primeira abordagem, foram considerados quatro filtros com apenas um anel circular, com seu raio externo (R_{1ext}) assumindo os valores de 14 mm, 12 mm, 10 mm e 8 mm. Para a obtenção desses valores, iniciou-se com um raio externo de 14 mm, e definiu-se que esse raio seria reduzido em 2 mm a cada ressonador projetado, em referência ao ressonador anterior. Definidos os valores de R_{1ext} , os filtros foram simulados e fabricados, como visto na Figura 40.

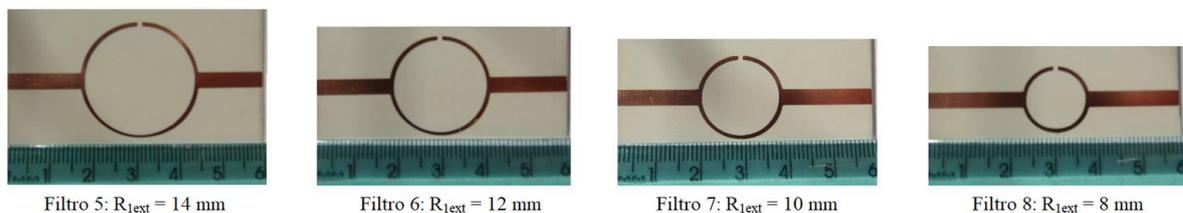


Figura 40 – Filtros 5 a 8, fabricados com um anel circular.

As respostas em frequência dos quatro filtros, S_{21} (dB) \times frequência (GHz), são apresentadas na Figura 41, com resultados numéricos e experimentais apresentando boa concordância.

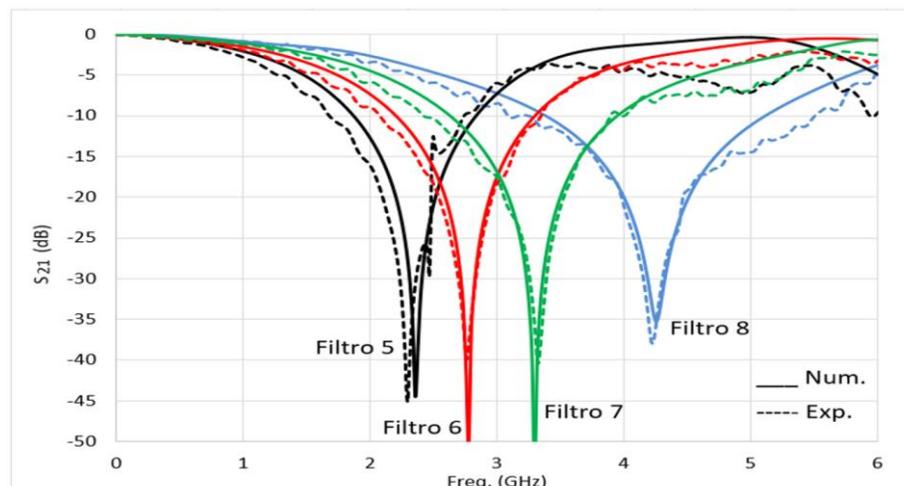


Figura 41 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para os filtros 5 a 8.

A Tabela 7 apresenta as especificações das respostas em frequência dos quatro filtros. Quando comparadas aos resultados experimentais, as frequências de ressonância obtidas a partir da equação (19) apresentaram uma máxima diferença de 2,6%, evidenciando um resultado muito bom para uma posterior otimização numérica.

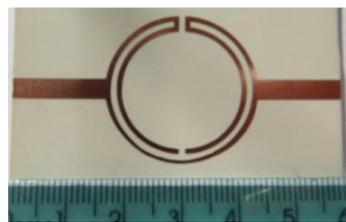
Tabela 7 – Comparação de resultados experimentais de filtros com um anel circular.

Parâmetro	Filtro 5	Filtro 6	Filtro 7	Filtro 8
R_{1ext} (mm)	14	12	10	8
fc_1 (GHz)	1,031	1,221	1,611	1,901
fc_2 (GHz)	-	5,001	5,490	6,230
fr_1 (GHz)	2,301	2,771	3,331	4,231
fr_1^* (GHz)	2,360	2,770	3,354	4,248
Faixa de Transição 1	1,210	1,480	1,660	2,260
Faixa de Transição 2	-	2,170	2,099	1,929
Largura de banda (GHz)	-	3,780	3,331	4,329
AL(dB)	45,11	39,85	40,41	37,94

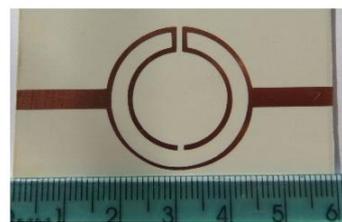
Nota: fr_1^* obtida a partir da equação (19)

4.2.2 Filtros com dois anéis circulares

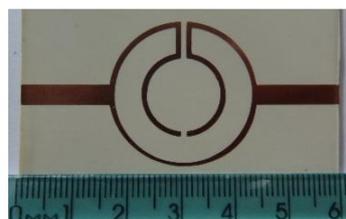
Na construção de filtros com dois anéis matrioska circulares, definiu-se, inicialmente, o valor de 14 mm para o raio externo do primeiro anel (R_{1ext}) de todos os ressonadores, ou seja, os filtros projetados ocupam a mesma área. Em seguida, variou-se o raio externo do segundo anel (R_{2ext}), assumindo os seguintes valores: 12 mm, 10 mm, 8 mm e 6 mm. Definidos os valores de R_{1ext} e R_{2ext} , os filtros foram simulados e fabricados, como visto na Figura 42.



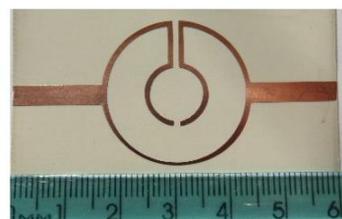
Filtro 9: $R_{2ext} = 12$ mm



Filtro 10: $R_{2ext} = 10$ mm



Filtro 11: $R_{2ext} = 8$ mm



Filtro 12: $R_{2ext} = 6$ mm

Figura 42 – Filtros 9 a 12, fabricados com dois anéis circulares.

A respostas em frequência obtidas são apresentadas na Figura 43, observando-se mais uma vez uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

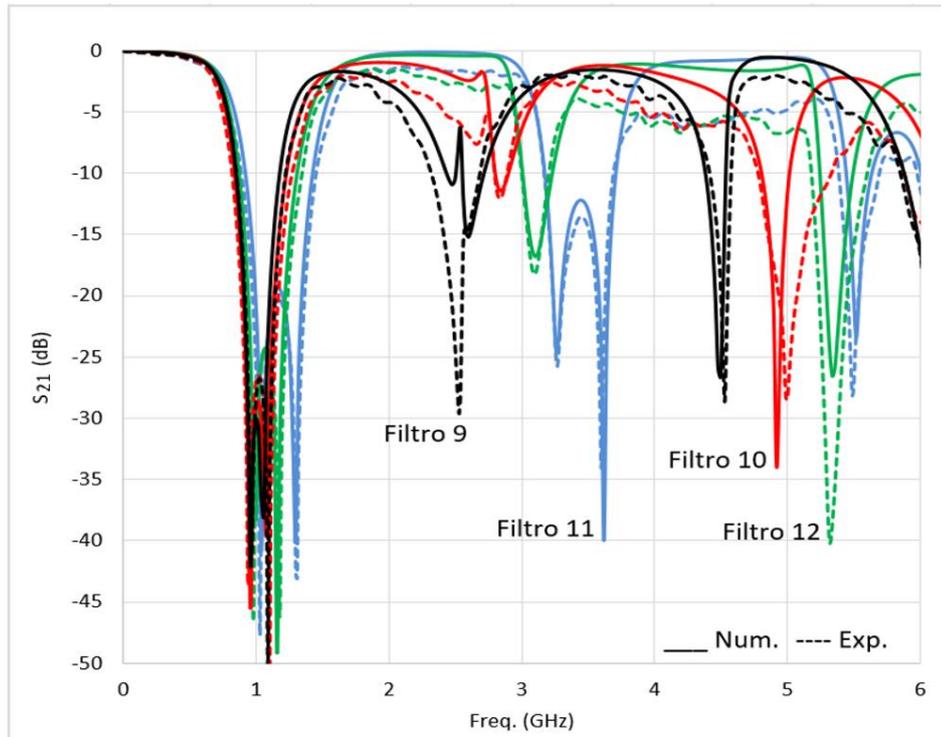


Figura 43 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para os filtros 9 a 12.

Para uma melhor análise da primeira faixa de ressonância dos filtros, as repostas em frequência são apresentadas de 0,6 GHz a 1,6 GHz, como visto na Figura 44.

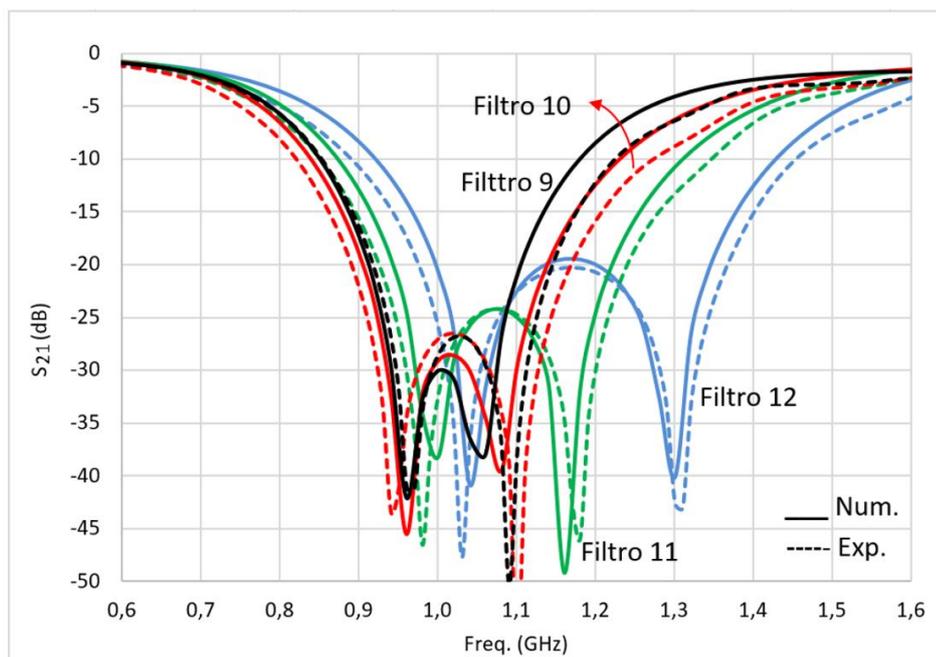


Figura 44 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para os filtros 9 a 12.

A Tabela 8 apresenta as especificações das respostas em frequência dos quatro filtros. Quando comparadas aos resultados experimentais, as frequências de ressonância (f_{r1}) e (f_{r2}) obtidas a partir da equação (22) apresentaram uma diferença máxima de 9,6% e 5,4%, respectivamente.

Tabela 8 – Comparação de resultados experimentais de filtros com dois anéis circulares.

Parâmetro	Filtro 9	Filtro 10	Filtro 11	Filtro 12
R_{1ext}	14	14	14	14
R_{2ext}	12	10	8	6
f_{c1} (GHz)	0,735	0,705	0,721	0,735
f_{c2} (GHz)	1,431	1,531	1,560	1,641
f_{r1} (GHz)	0,961	0,941	0,981	1,031
f_{r1}^* (GHz)	0,869	0,936	1,027	1,107
f_{r2} (GHz)	1,091	1,101	1,181	1,311
f_{r2}^* (GHz)	1,032	1,114	1,220	1,325
$f_{média}$	1,026	1,021	1,081	1,171
Faixa de Transição 1 (GHz)	0,210	0,220	0,238	0,276
Faixa de Transição 2 (GHz)	0,019	0,024	0,020	0,316
Largura de banda (GHz)	0,696	0,826	0,839	0,906
AL (dB)	26,75	26,51	24,25	20,25

Nota: f_{r1}^* e f_{r2}^* obtidas a partir da equação (22)

Realizando uma análise comparativa entre os resultados obtidos para os filtros de dois anéis matrioska circulares (filtros 9 a 12) e o filtro de um anel (filtro 5), com mesmo $R_{1ext} = 14$ mm, observa-se os seguintes pontos relevantes:

- ✓ A frequência de ressonância média do filtro com dois anéis é 55% menor (com $R_{2ext} = 12$ mm);
- ✓ A faixa de transição do filtro com dois anéis é 82% menor ($R_{2ext} = 12$ mm, faixa de transição 1);
- ✓ O filtro com um anel apresenta uma atenuação livre de no mínimo 18,38 dB maior que a maior atenuação livre para os filtros com dois anéis ($R_{2ext} = 12$ mm, $AL = 26,75$ dB);
- ✓ Variando o valor de R_{2ext} foi possível aumentar a largura de banda do filtro em 30,2%. Entretanto, com uma maior largura de banda, ocorreu também uma redução da atenuação livre, 6 dB;
- ✓ Os filtros com dois anéis apresentam uma menor faixa de frequência útil, limitada pela ocorrência de uma nova ressonância a partir de 2,5 GHz.

4.2.3 Filtro com três anéis circulares

Concluindo a lista de protótipos produzidos neste trabalho, foi projetado um filtro com três anéis matrioska circulares, filtro 13, cujos raios externos são: $R_{1ext} = 14$ mm, $R_{2ext} = 12$ mm e $R_{3ext} = 10$ mm. Notadamente, os dois maiores anéis do filtro 13 são idênticos ao filtro 9, dessa forma, visando facilitar a análise dos efeitos ocasionados pelo terceiro anel (filtro 13), são apresentadas, em conjunto, as respostas em frequência para esses dois filtros, Figura 45.

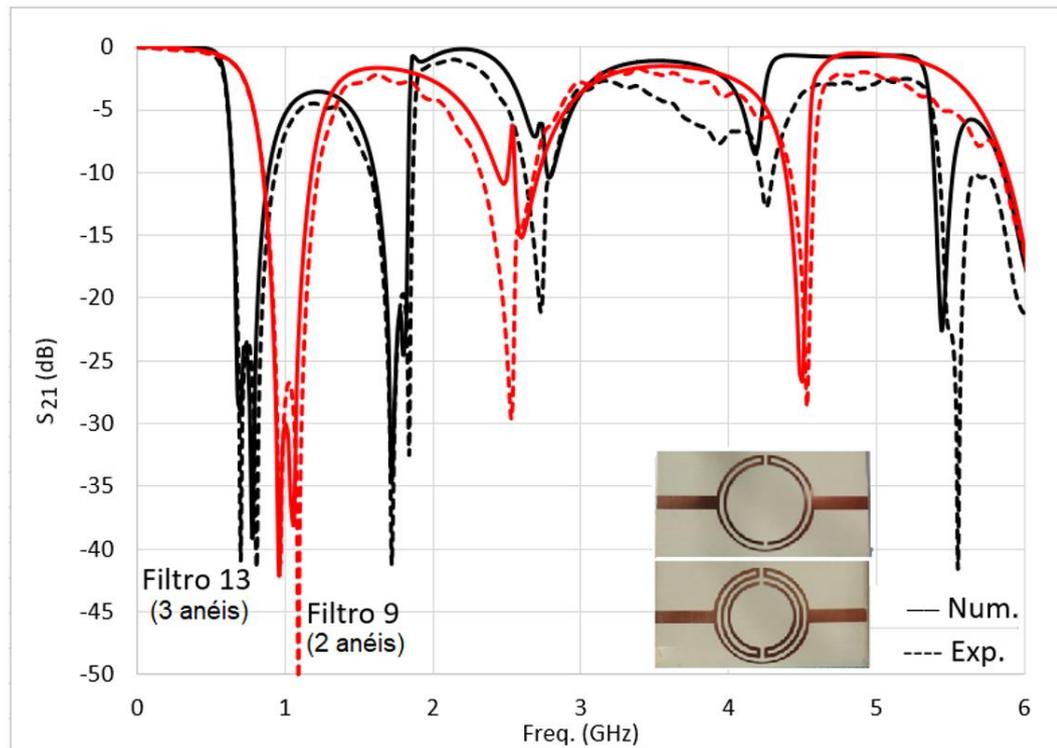


Figura 45 – S_{21} (dB) \times Freq. (GHz), para os filtros 9 e 13.

Observa-se que o filtro com três anéis apresenta menores frequências de ressonância, $f_{r1} = 0,701$ GHz e $f_{r2} = 0,811$ GHz, além disso, sua primeira faixa de transição é muito estreita, cerca de 0,095 GHz. Destaca-se que a sua faixa de frequência útil é bastante limitada, reduzindo bastante sua possibilidade de aplicação. Todavia, a continuidade da investigação pode revelar opções como, seu uso em cascata, ou em *defected ground structures* (DGS), que possibilitam contornar esses inconvenientes [11].

Por fim, os valores das frequências de ressonância calculados a partir de (22)–(26) foram $f_{r1} = 0,702$ GHz e $f_{r2} = 0,780$ GHz, valores muito bons quando comparados aos resultados experimentais.

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações finais

Neste trabalho foram desenvolvidos e caracterizados filtros planares baseados na geometria matrioska com anéis retangulares, aplicados na faixa de 2,4 GHz, notadamente conhecida pelo uso de redes Wi-Fi. Também foram desenvolvidos e caracterizados filtros planares baseados na geometria matrioska com anéis circulares, uma inovação em relação a trabalhos anteriores.

Inicialmente, foi realizado um estudo sobre os filtros, seus princípios básicos, classificações, características e aplicações. Os filtros de micro-ondas receberam atenção especial no Capítulo 3, incluindo os ressonadores em microfita. Com a revisão de trabalhos anteriores, a forma geométrica matrioska foi descrita e as equações iniciais de projeto foram propostas.

Treze filtros rejeita-faixa foram projetados, fabricados e caracterizados numericamente e experimentalmente, sendo quatro com anéis retangulares e nove com anéis circulares. No decorrer dos trabalhos, alguns protótipos projetados apresentaram divergências significativas entre os resultados simulados e medidos por conta do processo construtivo (uso de adesivos), mas as limitações e falhas foram mitigadas com a confecção de novos protótipos, revelando que esse método fabril possui certa limitação, especialmente em estruturas com dimensões reduzidas.

O ANSYS Designer 8.0 foi utilizado nas inúmeras simulações e na obtenção dos resultados numéricos. O Laboratório de Medidas em Telecomunicações do IFPB, com todo seu parque instrumental, foi fundamental para a caracterização experimental dos dispositivos.

Em relação aos treze filtros fabricados, seus resultados numéricos e experimentais foram considerados satisfatórios. As equações iniciais de projeto propostas apresentaram bons resultados, se comparados aos valores obtidos nas medições. No tocante às equações propostas para os filtros planares baseados na geometria matrioska com anéis circulares, destaca-se que representam um avanço nas pesquisas recentes do IFPB.

De acordo com os dados numéricos e experimentais, pode-se concluir que filtros planares baseados na geometria matrioska com anéis retangulares podem ser utilizados na faixa de Wi-Fi, destacando-se a utilização de anéis retangulares, com dimensões reduzidas próximas às da linha de transmissão.

Adicionalmente, os dados numéricos e experimentais também apontam que os novos filtros com geometria matrioska com anéis circulares possuem características semelhantes aos

filtros com anéis retangulares, inclusive em certas limitações. Entretanto, foi observada uma característica marcante nos filtros com anéis circulares, qual seja, uma menor faixa de frequência útil na primeira frequência de ressonância, limitada pela ocorrência de novas ressonâncias na faixa analisada de até 6 GHz.

Boa seletividade, regiões de transição reduzidas e miniaturização são os principais atrativos dos filtros com geometria matrioska, sejam de anéis retangulares ou circulares. Como aspecto negativo, a baixa atenuação livre limita a aplicação dos filtros em sistemas mais sensíveis, mas essa característica pode ser mitigada com o uso de mais um estágio em série.

5.2 Sugestões e continuidade dos trabalhos

Em trabalhos futuros, poderá ser explorada a construção de filtros com ressonadores matrioska em outra faixa de Wi-Fi, qual seja, 5,8 GHz, além de faixas de alto interesse comercial, por exemplo, 700 MHz (4G e 5G).

Também poderão ser realizadas configurações adicionais com ressonadores matrioska retangulares e circulares, como a utilização de estágios em série, especialmente aplicadas na produção de filtros *notch* integrados nas linhas de transmissão.

Outra aplicação a ser investigada é a utilização dos filtros com geometria matrioska para eliminação de modos de ordem superior em antenas planares.

Destaque-se ainda a possibilidade de utilização de estruturas tipo DGS para aumentar a atenuação livre dos filtros.

Concluindo, propõe-se a implementação de novos protótipos em laminados de FR4, visando especialmente reduzir custos.

TRABALHOS PUBLICADOS

Gomes Neto, A., Flor Neto, A., Andrade, M. C., Silva, Jefferson Costa e, Carvalho, J. N., Filtro rejeita-faixa compacto com reduzida região de transição para aplicação na faixa de 2,4 GHz. In: XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2018, Campina Grande, PB. Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2018. p. 75-79

Gomes Neto, A., Flor Neto, A., Andrade, M. C., Silva, Jefferson Costa e, Carvalho, J. N., Filtros em Microfita Utilizando a Geometria Anéis Matrioska Circulares. In: 18° SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 13° CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2018, Santa Rita do Sapucaí, MG. Anais do 18° SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 13° CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2018. v. 1. p. 366-370.

REFERÊNCIAS

- [1] Ribeiro, José Antônio Justino, **Engenharia de microondas: fundamentos e aplicações**, 1ª ed., São Paulo, Érica, 2008
- [2] Medeiros, Júlio Cesar de Oliveira, **Princípios de Telecomunicações: teoria e prática**. São Paulo, SP, Érica, 2007.
- [3] Número de usuários de smartphones em todo o mundo. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>> . Acesso em 15 de nov. de 2019.
- [4] L. Santaella, A. Gala, C. Policarpo, e R. Gazoni, Desvelando a Internet das Coisas, GEMInIS, vol. 4, nº 2, p. 19-32, dez. 2013.
- [5] Estações de telecomunicações compartilhando mesmo ambiente. Disponível em: <<http://www.agenciatelebrasil.org.br/media/ilu/antenas.jpg?UserActiveTemplate=site>>. Acesso em 15 de nov. de 2019.
- [6] ANATEL. Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil (PDF), 2017.
- [7] ANATEL. Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita, 2017.
- [8] Oludotun Olukoya, Djuradj Budimir, *Inkjet-printed bandstop filters for interference suppression in multi-standard wireless systems*, In Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference 2016, New Delhi, India, Dec. 5–9, 2016, pp. 1–4.
- [9] J. S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF Microwave Applications*, John Wiley, New York, 2001.
- [10] Jitha B, **Development of Compact Microwave Filters Using Microstrip Loop Resonators**, PhD. Thesis, Cochin Universtiy of Science and Technology, Cochin, India, 2010.
- [11] A. Gomes Neto, J. N. de Carvalho, J. G. de O. Mariano, T. R. de Sousa, Análise da aplicação da geometria matrioska aos filtros em microfita, in MOMAG2016, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 25–29 de julho, 2016, pp. 1-5.
- [12] Mariano, Josefa Gilliane de Oliveira, **Implementação de Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska**, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2017.

- [13] Viega, Sara. Qual é a história das matrioskas, as bonecas russas? Disponível em: <<https://educacao.umcomo.com.br/artigo/qual-e-a-historia-das-matrioskas-as-bonecas-russas-6266.html>>. Acesso em 9 de mai. de 2018.
- [14] A. G. Neto, et al., “*Multiband frequency selective surface with open matryoshka elements,*” *9th European Conference on Antennas and Propagation*, v.1, Lisboa, 2015.
- [15] 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.
- [16] J. N. Cruz, **Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta**, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2015.
- [17] Lathi, B. P. **Modern digital and analog communication systems**. New York: Oxford University Press, 1998.
- [18] D.M. Pozar, **Microwave Engineering**, 3rd ed., New York, Wiley, 2005.
- [19] K. Lacanette, *A Basic Introduction to Filters – Active, Passive and Switched Capacitor*, Application Note 779, National Semiconductor, 22p, April, 1991.
- [20] Frenzel Jr., Louis E., **Eletrônica moderna: Fundamentos, dispositivos, circuitos e sistemas**, McGraw Hill, São Paulo, 2015.
- [21] Mussoi, Fernando L. R, *Resposta em Frequência Filtros Passivos*, Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.
- [22] Diego Ramalho Minervino, **Desenvolvimento de estruturas integradas de filtros e antenas para aplicação em sistemas de comunicação sem fio**, Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, Brasil, 2013.
- [23] A. Gomes Neto. *Micro-ondas: Linhas de transmissão*, 2017. 6 f. Notas de Aula. Micro-ondas.
- [24] Filtro passivo. Disponível em: <<https://www.sono-apli.com/filtros-pasivos/894-filtro-pasivo-beyma-f-130.html>>. Acesso em 6 de mar. de 2020.
- [25] Filtro ativo. Disponível em: <<https://pt.dhgate.com/product/new-uaf42-active-filter-module-highpass-lowpass/446395935.html#seo=WAP>>. Acesso em 09 de mar. de 2020.
- [26] Filho, Sidnei. **Filtros seletores de sinais**. 3^a ed. Florianópolis, SC. Ed. da UFSC, 2010.
- [27] Edwards, T. C., **Foundations for Microstrip Circuit Desigs**, Jonh Wiley and Sons, New York, 1991.
- [28] ITU. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-R/Pages/default.aspx>>. Acesso em 11 de dez. de 2019.

- [29] Filtro de microfita. Disponível em: < http://www.giga.co.za/ocart/index.php?route=product/product&product_id=448 >. Acesso em 12 de mar. de 2020.
- [30] Brasilsat, Filtro de guia de ondas. Disponível em: <<https://www.brasilsat.com.br/pt/interferencia.pdf>> >. Acesso em 12 de mar. de 2020.
- [31] IEEE. Disponível em: https://standards.ieee.org/standard/802_11ad-2012.html, acesso em 10/05/2020.
- [32] MSCALC. Disponível em: <<http://www.emtalk.com/mscalc.php>>. Acesso em 2 de jun. de 2020.
- [33] APPCAD. Disponível em: <<http://www.hp.woodshot.com/>>. Acesso em 17 de mai. de 2018.
- [34] A. Boutejdar, A. Batmanov, A. Omar, and E. Burte, “A new method to improve the rejectband of a 5.6 GHz bandstop filter using $\lambda/2$ open-loop ring microstrip resonators,” in APMC 2008, Asia-Pacific Microwave Conference, Hong Kong, Dec. 16–20, 2008, pp. 1–4.
- [35] Ansys, Designer 8.0. Disponível em: <<http://www.ansys.com>>. Acesso em 17 de mai. de 2018.
- [36] RO3003. Disponível em: <<https://rogerscorp.com/advanced-connectivity-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003-laminates>>. Acesso em 3 de jun. de 2020.
- [37] E5071C, Analisador de redes datasheet. Disponível em: <http://www.keysight.com/pt/pdx-x202270-pn-E5071C/ena-series-networkanalyzer?nid=32496.1150429&cc=BR&lc=por&pm=ov>. Acesso em 22 de ago. de 2018.