



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

HADASSA JULIANA DA COSTA GOMES

**PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE FILTROS UTILIZANDO SUBSTRATO DE
MATERIAIS PARA IMPRESSÃO 3D**

CARAÚBAS/RN

2019

HADASSA JULIANA DA COSTA GOMES

**PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE FILTROS UTILIZANDO SUBSTRATO DE
MATERIAIS PARA IMPRESSÃO 3D**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Caraúbas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Brito Filho - UFERSA

CARAÚBAS/RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

G633p Gomes, Hadassa Juliana da Costa.
Projeto e Caracterização de Filtros Utilizando
Substrato de Material para Impressão 3D / Hadassa
Juliana da Costa Gomes. - 2019.
46 f. : il.

Orientador: Francisco de Assis Brito Filho.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de --Selecione um
Curso ou Programa--, 2019.

1. RF. 2. Microfita. 3. Manufatura Aditiva. I.
Filho, Francisco de Assis Brito, orient. II.
Título.

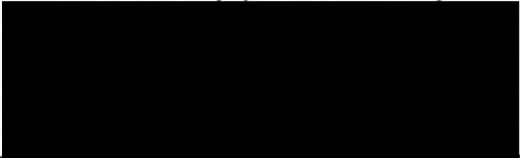
HADASSA JULIANA DA COSTA GOMES

**PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE FILTROS UTILIZANDO SUBSTRATO DE
MATERIAIS PARA IMPRESSÃO 3D**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

Defendida em: 12 / 08 / 2019.

Assinatura dos membros da Banca Examinadora.



D.Sc. Francisco de Assis Brito Filho
Presidente



D.Sc. Hugo Michel Câmara de Azevedo Maia
Membro



D.Sc. Francisco das Chagas Barbosa Sena
Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeira mão a minha família, que à sua maneira, sempre incentivou e deu base à minha formação acadêmica. Em especial às minhas duas mães Maria de Fátima (avó) e Joédna Fabia, que não medem esforços para me ajudar de todas as formas que preciso dentro de sua capacidade. Aos meus tios/irmãos que também se encaixam nesse último caso.

Agradeço a Sabrina, Vitória e Mayssa, que além de serem minhas irmãzinhas, se tornaram minhas melhores amigas. Sou muito grata pelos momentos de intensa alegria ao lado de vocês, que talvez não saibam, mas me ajudaram muito a ter forças para seguir em frente.

Agradeço a Diego, que me ajudou em um momento onde eu não podia contar com mais ninguém, ele amarrou os seus problemas para me ajudar com os meus. Agradeço também a Juliana Felix e os demais amigos de Apodi que se prestaram a me alegrar mesmo quando eu não queria e mesmo sem saber o porquê.

Não posso deixar de agradecer aos que me deram forças desde o início, em especial Mara (e o Ap 04 todo), Gesley, e Cícero, meus companheiros de classe que sempre me deram incentivo e forças. Também agradeço aos que chegaram depois para melhorar tudo, meus melhores amigos desse período, Iara, Jorge e Filipe, vocês não imaginam o quanto foram importantes para mim nesse período, obrigada por se importarem e por cuidarem de mim de alguma forma.

Agradeço também aos meus amigos da residência como um todo, não tenho nem como citar todos, mas eu tenho certeza que vocês sabem o quanto são importantes para mim e o quanto me ajudaram, em especial ao quarto 5 da ala A, feminina e ao quarto 15 da ala B masculina.

Agora eu gostaria de agradecer aos que fizeram esse trabalho ganhar vida. Aleandro, sem você eu não teria conseguido, obrigada por gastar dias inteiros me ajudando, mesmo tendo sempre muita coisa a fazer, saiba que este trabalho foi concluído por causa de sua constante contribuição. A Tião e Geovane que me ajudaram nos minutos finais, ao pessoal do LAMERF/LIEB que de alguma forma contribuíram para o andamento deste trabalho.

E por último, mas de forma alguma menos importante, agradeço ao meu Orientador Brito Filho, que me guiou neste projeto e sempre me motivou sendo um excelente profissional. Obrigada principalmente por ter me compreendido em momentos que falhei, e por toda a paciência que demonstrou ao longo do nosso convívio, saiba que você é um grande exemplo para mim. Agradeço, também, a banca pelo tempo disponibilizado na leitura e avaliação do meu trabalho.

RESUMO

Filtros são redes de duas portas utilizados para permitir ou atenuar a passagem de determinadas frequências, de acordo com sua aplicação. Sendo dispositivos de grande importância em telecomunicações, a utilização de novos meios de construção de filtros de RF e microondas traz uma grande contribuição para essa área. Neste sentido, o presente trabalho apresenta a construção de filtros planares de microfita que utilizem substrato polimérico impresso em 3D. Antes de se iniciar a confecção dos filtros, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o funcionamento dessas estruturas, seguida de simulações dos protótipos com uso do software HFSS. Os protótipos de filtros foram desenvolvidos utilizando o substrato de ABS, com técnicas diferentes de montagem, de modo a avaliar a influência do resultado final do acabamento do substrato e do ressoador. Os filtros construídos apresentaram bom desempenho e respostas em frequência muito próximas às das simulações, de forma a exaltar a viabilidade da confecção de dispositivos de RF e microondas que utilizam de manufatura aditiva na sua produção.

Palavras-chave: RF. Microfita. Manufatura Aditiva.

ABSTRACT

Filters are two-port networks used to allow or attenuate passage of certain frequencies according to your application. Being devices of great importance in telecommunication, the use of new means of construction of RF and microwave filters brings a great contribution to this area. In this sense, the present work shows the construction of planar microstrip filters using 3D printed polymeric substrate. Before starting to make the filters, a bibliographic research on the functioning of these structures was made, followed by simulations of the prototypes using the HFSS software. Filter prototypes were developed using the ABS substrate, with different assembly techniques, in order to evaluate the influence of the final result of the substrate and resonator finish. The built filters presented good performance and frequency responses very close to the simulations, in order to enhance the feasibility of making RF and microwave devices that use additive manufacturing in their production.

Keywords: RF. Microstrip. Additive Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura Geral de uma Linha de Microfita	19
Figura 2: Disposição das Linhas de Campo em uma Linha de Microfita	19
Figura 3: Representação de um Filtro por uma Rede de duas Portas	20
Figura 4: Curva de Resposta em Frequência de um Filtro Passa Baixa Ideal	24
Figura 5: Curva de Resposta em Frequência de um Filtro Passa Alta Ideal	24
Figura 6: Curva de Resposta em Frequência de um Filtro Passa Faixa Ideal	25
Figura 7: Curva de Resposta em Frequência de um Filtro Rejeita Faixa Ideal	26
Figura 8: Modelo de uma Linha de Transmissão sem Perdas.	26
Figura 9: Filtro passa baixa	27
Figura 10: Filtro Rejeita Banda	27
Figura 11: <i>Stub</i> Terminado em Vazio = Filtro Rejeita Faixa	28
Figura 12: <i>Stub</i> terminado em curto-circuito = Filtro Passa Faixa.....	28
Figura 13: Dimensões do ressoador em anel retangular.....	30
Figura 14: Dimensões do ressoador <i>hairpin</i>	30
Figura 15: Dimensões ressoador stub	31
Figura 16: MiniVNA Tiny.....	34
Figura 17: Filtros Passa Faixa rugoso e com acabamento em acetona.....	35
Figura 18: Filtros Passa Baixa <i>hairpin</i> rugoso e com acabamento em acetona	37
Figura 19: Filtros stub passa baixa rugoso e acabado em acetona	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curvas de Resposta do filtro em anel.....	36
Gráfico 2: Curvas de resposta do filtro hairpin	38
Gráfico 3: Curvas de resposta do filtro <i>stub</i>	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização do ABS.....	31
--------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AM	Manufatura Aditiva
FDM	Modelagem por Deposição Fundida
RF	Radio Frequência
SL	Estereolitografia
TEM	Transversal Eletromagnético
VNA	Vector Network Analyzer

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Linhas de Transmissão	18
2.1.1 Linhas de Microfita	18
2.2 Filtros.....	20
2.2.1 Análise das Variáveis de um Filtro	20
2.2.1.1 Parâmetros de Espalhamento	22
2.2.2 Classificação de Filtros	23
2.2.1.1 Filtros Passa Baixa	23
2.2.1.2 Filtros Passa Alta.....	24
2.2.1.3 Filtro Passa Faixa	25
2.2.1.4 Filtro Rejeita Faixa	25
2.3 Projeto de Filtros	26
3 METODOLOGIA	29
3.1 Topologias dos filtros construídos	29
3.1.1 Ressonador	29
3.2 Características do substrato	31
3.3 Simulações dos Filtros.....	32
3.4 Construção dos filtros	32
3.4.1 Material e equipamento utilizado	32
3.4.2 Métodos de construção.....	32
3.4.2.1 Filtro passa faixa	32

3.4.2.2 Filtros passa baixa e rejeita faixa.....	33
3.5 Testes	33
4. RESULTADOS.....	35
4.1 Filtro Passa Faixa com Anel Ressorador Retangular.....	35
4.2 Filtro Passa Baixa <i>hairpin</i> SIR.....	37
4.3 Filtro Rejeita Faixa <i>stub</i> a vazio	38
5 CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, com o avanço das telecomunicações, a construção de estruturas planares tem desempenhado o importante papel no desenvolvimento de dispositivos menores, de baixo peso e baixo custo, tornando essas estruturas mais aplicáveis em sistemas de comunicação sem fio. Deste modo, surge a necessidade de atender à crescente demanda da sociedade por bens e serviços que utilizam dispositivos que operem em diferentes faixas de frequência sem que haja interferência entre os serviços oferecidos (MARIANO, 2017).

As estruturas planares tornaram-se mais atraentes do ponto de vista científico, principalmente devido à maior simplicidade de verificação do circuito experimental (GOMEZ-GARCIA et al., 2014). Neste sentido, observa-se que o desenvolvimento de filtros planares tem atraído o interesse de diversos pesquisadores. Segundo Wentworth (2009), os filtros são redes de duas portas utilizadas para atenuar frequências não desejáveis, ou seja, um filtro é projetado para bloquear ou refletir algumas frequências e permitir a passagem de outras. As suas aplicações abrangem as mais diversas áreas, usadas nas comunicações móveis, sistemas de comunicação por satélite, radar, sistemas de radiodifusão, entre outras.

A principal característica de um filtro é a sua sensibilidade à frequência do sinal, ou sua seletividade, de modo que a resposta em frequência de um filtro pode classifica-lo como: passa-baixa, passa-faixa, passa-alta e rejeita-faixa (NASCIMENTO, 2000). O que define essa resposta em frequência é a geometria do filtro, bem como suas dimensões, que podem ser obtidas a partir das características do material utilizado no substrato, como sua permissividade elétrica relativa, espessura e tangente de perdas (SERRANO, 2007).

O desenvolvimento de técnicas de fabricação desse tipo de componente, torna-se então, um atrativo de grande importância nas áreas de telecomunicação. Atualmente, a manufatura aditiva (AM) é explorada como um contendor no processo de circuitos e sistemas eletrônicos para simplificar e reduzir custos. O preço das impressoras e materiais 3D usados em técnicas aditivas continua a reduzir e, ao mesmo tempo, essa tecnologia ganha popularidade e utilidade.

As tecnologias atuais de impressão 3D incluem Modelagem por Deposição Fundida (FDM), Estereolitografia (SL) e Sinterização Seletiva a Laser. Em particular, a técnica de FDM, possibilita a obtenção de impressoras e materiais de baixo custo a partir de plásticos com diferentes propriedades (MARTINEZ et al., 2019). A impressão FDM envolve o uso de filamentos de materiais enrolados em um carretel que é então passado por uma extrusora aquecida para atingir a temperatura de transição vítrea (BAHR et al., 2015).

Os benefícios do uso de manufatura aditiva são aparentes, as vantagens da impressão 3-D incluem economia de tempo na criação de projetos, produção em massa dos dispositivos e a capacidade de criar novos dispositivos que não podem ser feitos usando as técnicas de fabricação convencionais (DEFFENBAUGH; RUMPF; CHURCH, 2013).

Diante do conteúdo apresentado, este trabalho propõe a construção de filtros planares que utilizem de substratos feitos de material para impressão 3D, para que possa se verificar a viabilidade de sua aplicação nos sistemas que se utilizem de determinadas faixas de frequência.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O trabalho tem por finalidade construir filtros planares de microfita utilizando um substrato obtido através da técnica de impressão 3D na sua construção.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Compreender fisicamente como funcionam todos os processos de um filtro planar;
- Utilizar a técnica de impressão em 3D como parte do processo de construção de filtros planares;
- Dimensionar filtros de acordo com as características do material do substrato e simular os mesmo com uso do ANSYS HFSS;
- Construir os filtros e testar seu funcionamento;
- Verificar a influência do substrato feito de ABS no comportamento dos filtros;
- Avaliar e comparar os filtros construídos com os filtros simulados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste Capítulo, será apresentada a teoria que da base ao funcionamento dos filtros que serão desenvolvidos.

2.1 Linhas de Transmissão

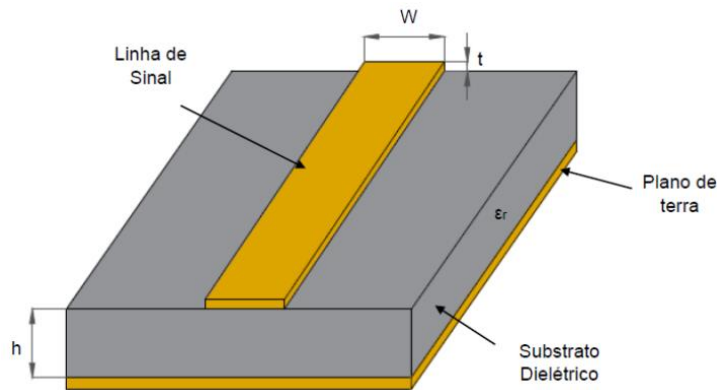
De acordo com Pozar (2012), uma linha de transmissão é uma rede de parâmetros distribuídos, onde as tensões e correntes podem variar em magnitude e fase ao longo do seu comprimento. As linhas de transmissão podem ter uma fração considerável de comprimento de onda, ou muitos comprimentos de onda, em tamanho. Sua estrutura consiste basicamente de dois ou mais condutores paralelos usados para conectar uma fonte à uma carga (SADIKU, 2004).

Uma propriedade única das linhas de transmissão é que uma análise satisfatória de suas propriedades pode ser realizada tratando-a como uma rede com parâmetros distribuídos e resolvendo para as ondas de tensão e corrente que podem se propagar ao longo da linha (COLLIN, 2001). Exemplos de linhas de transmissão incluem: cabo coaxial, linha a dois fios condutores (linha bifilar), linha planar ou de placas paralelas, um fio paralelo a um plano condutor e a linha de microfita (SADIKU, 2004). Desses modelos de linha, o presente trabalho utilizará a linha de microfita.

2.1.1 Linhas de Microfita

Collin (2001) define a linha de transmissão planar como, uma linha de transmissão formada por fitas de metal condutor que se encontram dispostas em planos paralelos. Uma linha de transmissão planar que é amplamente utilizada é a linha de microfita, sua estrutura geral é ilustrada na Figura 1. Uma fita condutora com uma largura W e uma espessura t disposta sobre um substrato dielétrico, que possui uma constante dielétrica relativa ϵ_r e uma espessura h , e a parte inferior do substrato é um plano de terra também condutor (HONG; LANCASTER, 2001).

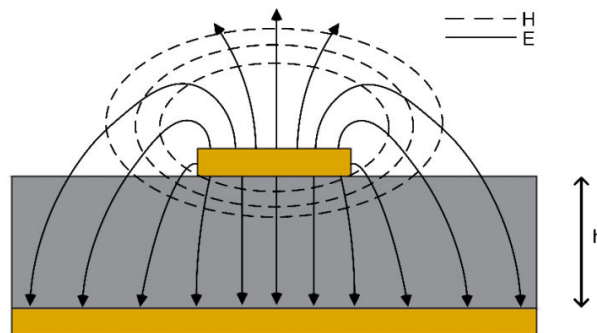
Figura 1: Estrutura Geral de uma Linha de Microfita



Fonte: (OLIVEIRA, 2018)

Para a linha de microfita mostrada na Figura 1, as linhas de campo elétrico típicas são mostradas na Figura 2. Esta é uma linha não homogênea de dois dielétricos; tipicamente o substrato e o ar. Como pode ser visto, a maioria das linhas de campo elétrico estão concentradas no substrato e partes de algumas linhas residem no ar (BALANIS, 2005; ROMANI, 2006).

Figura 2: Disposição das Linhas de Campo em uma Linha de Microfita



Fonte: (OLIVEIRA, 2018)

Segundo Sengupta e Liepa (2006), na ausência do substrato dielétrico ($\epsilon_r = 1$) ou se todo o espaço fosse preenchido com um dielétrico homogêneo (ϵ_r), poderíamos pensar na microfita como uma linha de placa paralela consistindo de duas tiras condutoras planas de largura W e separados por uma distância de $2h$. Nesse caso, teríamos uma linha de transmissão propagando o modo Transversal Eletromagnético (TEM) simples. Quando os componentes longitudinais dos campos elétrico e magnético para o modo dominante de uma linha de

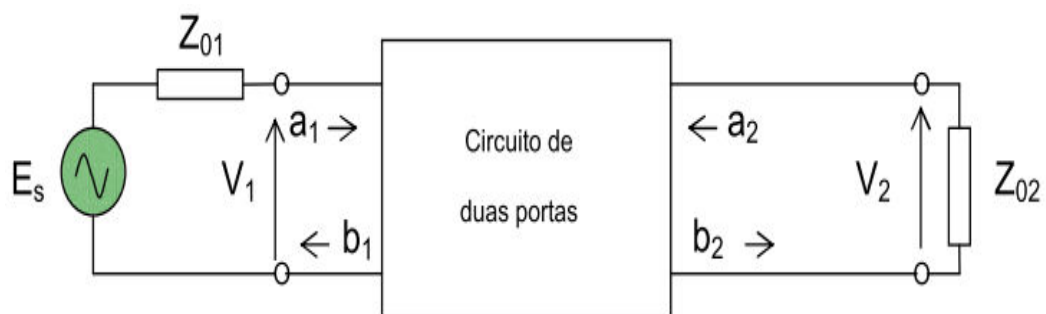
microfita permanecem muito menores do que os componentes transversais, eles podem ser negligenciados. Neste caso, o modo dominante se comporta como um modo quase-TEM e a teoria de análise para linhas de transmissão em modo TEM pode ser aplicada também às linhas de transmissão em microfita na faixa inferior de microondas (até 10 GHz) (HONG; LANCASTER, 2001; ZULUAGA, 2007).

As linhas de microfita são amplamente utilizadas como linhas de transmissão para circuitos integrados de microondas e em placas de circuito impresso. Elas também são usadas para componentes de circuito, como filtros, acopladores, ressonadores, antenas, etc. Em comparação com a linha coaxial, as linhas de microfita permitem maior flexibilidade e projetos mais compactos (SADIKU, 2004; SENGUPTA; LIEPA, 2006).

2.2 Filtros

Como representado na Figura 3, um filtro é uma rede de duas portas usada para controlar a resposta de frequência em um determinado ponto em um sistema de Rádio Frequência (RF) ou de microondas, fornecendo transmissão nas frequências dentro da banda passante do filtro e atenuação na faixa de parada do filtro. As aplicações podem ser encontradas em praticamente qualquer tipo de comunicação de RF ou microondas, radar ou sistema de teste e medição (POZAR, 2012).

Figura 3: Representação de um Filtro por uma Rede de duas Portas



Fonte: (ALVES, 2007)

2.2.1 Análise das Variáveis de um Filtro

Segundo Alves (2007), os filtros podem ser analisados através do uso de dois tipos de matrizes: a matriz de espalhamento S, e a matriz de transmissão ABCD. Na Figura 3 são mostradas as variáveis de tensão e corrente nas portas 1 e 2, que são V_1 , V_2 , I_1 e I_2 ; as variáveis

de impedância dos terminais são Z_{01} e Z_{02} e uma fonte de voltagem E_s . Sendo enviado um sinal senoidal, as variáveis de tensão e corrente são complexas, de modo que um sinal senoidal na porta 1 seja dado por:

$$v_1(t) = |V_1| \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Isso implica que:

$$v_1(t) = |V_1| \cos(\omega t + \varphi) = \text{Re}(|V_1|e^{j(\omega t + \varphi)}) = \text{Re}(V_1 e^{j\omega t}) \quad (2)$$

Em que Re é a parte real da expressão. Então, a identidade complexa pode ser mostrada como:

$$V_1 = |V_1|e^{j\varphi} \quad (3)$$

As variáveis de sinal a_1 , b_1 , a_2 e b_2 , também mostradas na Figura 3, são introduzidas na análise a fim de medir os sinais de tensão e corrente, onde a indica o sinal incidente e b o sinal refletido. Relacionando essas variáveis com as variáveis de voltagem e corrente se obtém:

$$\begin{cases} V_n = \sqrt{Z_{0n}}(a_n + b_n) \\ I_n = \frac{1}{\sqrt{Z_{0n}}}(a_n - b_n) \end{cases}, n = 1 \text{ e } 2 \quad (4)$$

$$\begin{cases} a_n = \frac{1}{2} \left(\frac{V_n}{\sqrt{Z_{0n}}} + \sqrt{Z_{0n}} I_n \right) \\ b_n = \frac{1}{2} \left(\frac{V_n}{\sqrt{Z_{0n}}} - \sqrt{Z_{0n}} I_n \right) \end{cases}, n = 1 \text{ e } 2 \quad (5)$$

A potência na porta n é dada por:

$$P_n = \frac{1}{2} \text{Re}(V_n I_n^*) = \frac{1}{2} (a_n a_n^* - b_n b_n^*) \quad (6)$$

Onde o asterisco representa o conjugado. É possível notar que $\frac{1}{2}(a_n a_n^*)$ é a potência da onda incidente e $\frac{1}{2}(b_n b_n^*)$ é a potência da onda refletida na porta n (DANTAS, 2008).

2.2.1.1 Parâmetros de Espalhamento

A matriz de espalhamento S relaciona as potências transmitidas e refletidas discutidas na seção anterior, como se segue. Os parâmetros de espalhamento ou parâmetros S são definidos em termos das variáveis de onda como:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (7)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}$$

Onde $a_n = 0$ implica o casamento perfeito de impedância na porta n . Estas definições podem ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Em que a matriz contendo os parâmetros S é denominada de matriz S , que pode ser referida por $[S]$. Os coeficientes dos parâmetros S definidos acima são relações lineares. Os parâmetros S podem ser definidos como uma razão em decibéis. Como os parâmetros S são razões de tensão, eles são expressos como (ALVES,2007):

$$S_{11}(dB) = 20 \log |S_{11}|$$

$$S_{12}(dB) = 20 \log |S_{12}|$$

(9)

$$S_{21}(dB) = 20 \log|S_{21}|$$

$$S_{22}(dB) = 20 \log|S_{22}|$$

A forma linear de S_{11} é geralmente chamada de coeficiente de reflexão e a forma em decibéis é referenciado como perda de retorno, enquanto que a forma linear de S_{21} é geralmente chamada de coeficiente de transmissão e a forma em decibéis é referenciado como perda de inserção (FRANÇA, 2012).

2.2.2 Classificação de Filtros

Os filtros podem ser classificados de diferentes maneiras. Quanto a tecnologia empregada, os filtros podem ser ativos ou passivos. São tidos ativos quando compostos por elementos que podem prover ganho de potência como transistores e amplificadores operacionais; e passivos quando são construídos apenas utilizando dispositivos passivos dos circuitos, ou seja, resistores, capacitores e indutores. Por não possuírem componentes ativos, esse segundo tipo de filtro apresenta a vantagem de não necessitar de fonte de alimentação. Além disso, apresentam ótimo desempenho em alta frequência, e geram menos ruídos se comparado aos circuitos que utilizam componentes ativos (GÓES, 2013; SASAKI; OSHIRO, 2014).

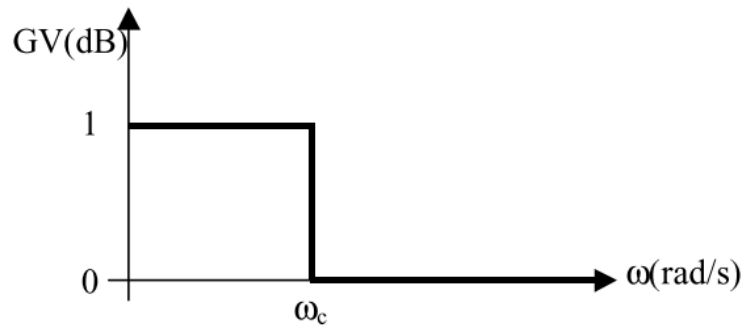
Quanto à função executada, os filtros são classificados em quatro tipos principais: Passa Baixa, Passa Alta, Passa Faixa e Rejeita faixa, de acordo com sua resposta em frequência (SASAKI; OSHIRO, 2014).

2.2.1.1 Filtros Passa Baixa

Mussoi (2004) define um filtro passa baixa como um circuito que permite a passagem de sinais de tensão e corrente somente em frequências abaixo de um certo limite, enquanto atenua os sinais de frequência superiores a esse valor. Esse valor limite de frequência é a Frequência de Corte (ω_c) do filtro. As respostas em frequência dos filtros passa-baixa,

geralmente representam o comportamento do coeficiente de transmissão (em dB) em função da frequência (MINERVINO, 2013). A Figura 4 mostra o comportamento de um filtro passa baixa ideal.

Figura 4: Curva de Resposta em Frequência de um Filtro Passa Baixa Ideal

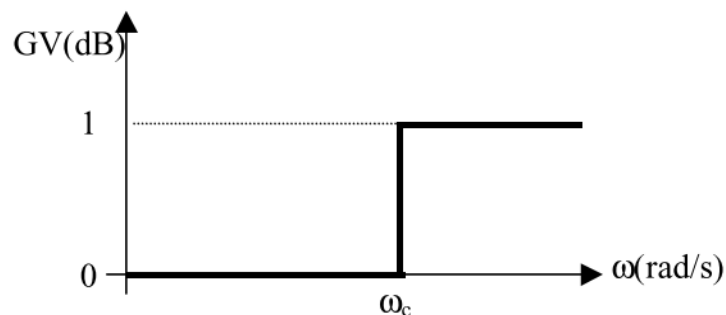


Fonte: (MUSSOI, 2004)

2.2.1.2 Filtros Passa Alta

Um Filtro passa alta é definido como um circuito que permite a passagem de sinais de tensão e corrente somente em frequências acima da frequência de corte, atenuando os sinais de frequência inferiores a esse valor, apresentando, assim comportamento inverso ao do filtro passa baixa. A Figura 5 representa o ganho de tensão de um passa alta ideal em função da frequência (MINERVINO, 2013; MUSSOI, 2004).

Figura 5: Curva de Resposta em Frequência de um Filtro Passa Alta Ideal

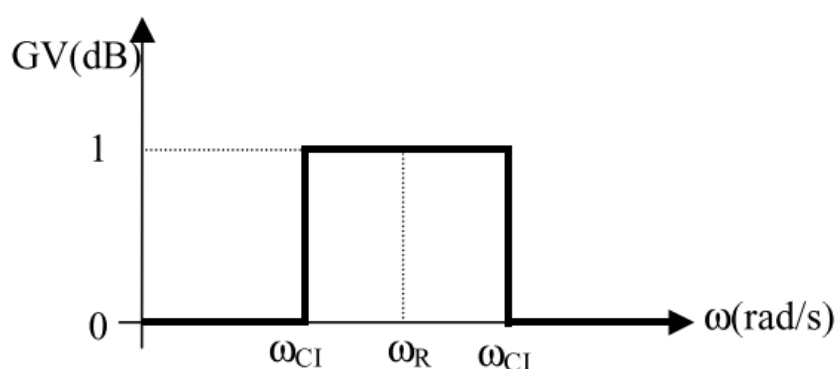


Fonte: (MUSSOI, 2004)

2.2.1.3 Filtro Passa Faixa

Minervino (2013) define um filtro passa faixa (ou passa banda) como uma combinação dos filtros passa baixa e passa alta. Este tipo de filtro permite a passagem de sinais de tensão e corrente com frequências situadas dentro de uma faixa intermediária, enquanto atenua os sinais com frequências tanto abaixo quanto acima da faixa de interesse, que é delimitada por uma frequência de corte inferior (ω_{CI}) e uma frequência de corte superior (ω_{CS}) (MUSSOI, 2004). A Figura 6 ilustra o comportamento ideal do filtro passa faixa.

Figura 6: Curva de Resposta em Frequência de um Filtro Passa Faixa Ideal

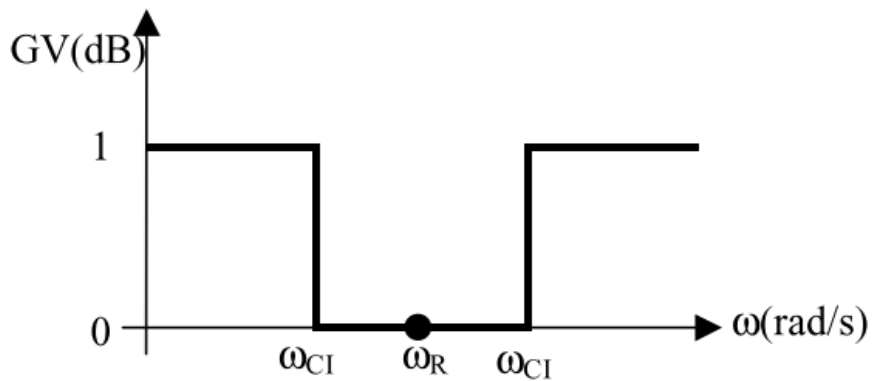


Fonte: (MUSSOI, 2004)

2.2.1.4 Filtro Rejeita Faixa

O filtro rejeita faixa, apresenta comportamento inverso ao do filtro passa faixa, de modo que impede a passagem de sinais de tensão e corrente com frequências situadas numa faixa intermediária, enquanto permite a passagem de sinais com frequências acima ou abaixo dessa faixa, que de maneira análoga, é delimitada por uma frequência de Corte Inferior (ω_{CI}) e uma frequência de Corte Superior (ω_{CS}) (MINERVINO, 2013; MUSSOI, 2004). A Figura 7 exemplifica o comportamento desse tipo de filtro.

Figura 7: Curva de Resposta em Frequência de um Filtro Rejeita Faixa Ideal



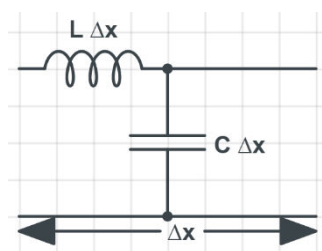
Fonte: (MUSSOI, 2004)

2.3 Projeto de Filtros

A implementação de um filtro passivo é feita pela associação de capacitores e indutores, formando um circuito ressonante. Os elementos indutivos e capacitivos são conectados de modo a proporcionar a distinção entre as correntes alternadas e assim, permitir ou não a passagem de determinada frequência ou banda de frequências (NETO, 2012). Pequenos trechos de linhas de microfita em curto ou em aberto podem se comportar como um indutor ou capacitor, respectivamente. Podendo assim ser usados para substituir os capacitores e indutores discretos por trechos de linhas microfita. Isso é possível para as frequências nas quais esses trechos são muito pequenos em comparação ao comprimento da onda (FRANÇA, 2012).

Romani (2006) cita que um método para transformar filtros em parâmetros localizados em microfita, é empregando linhas extremamente largas e extremamente estreitas que podem ser adequadamente acomodadas. A Figura 8 mostra o modelo elétrico para linhas de transmissão sem perdas.

Figura 8: Modelo de uma Linha de Transmissão sem Perdas.

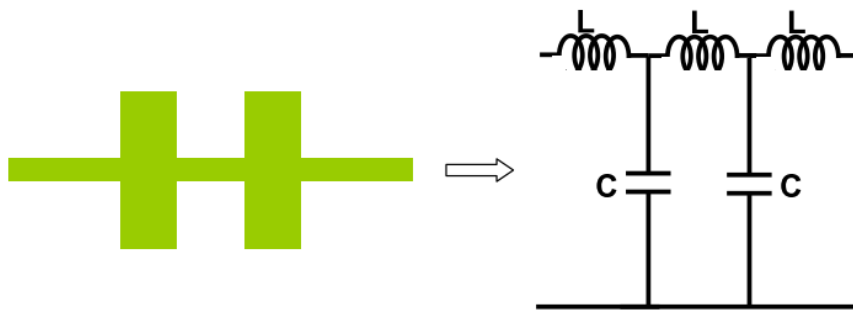


Fonte: Autoria Própria (2019)

O trecho de linha de comprimento infinitesimal Δx pode ser modelado como um circuito de elementos distribuídos, onde L e C são quantidades por unidade de comprimento, de modo que as linhas comportem-se como indutâncias em série ou capacitâncias em paralelo (ALVES, 2007; POZAR, 2012)

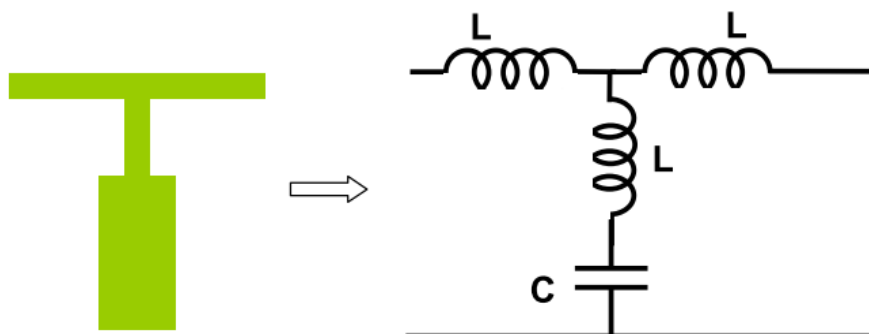
Quando a linha é muito estreita, a indutância predomina sobre a capacitância, comportando-se como uma indutância série entre a entrada e a saída. Por outro lado, linhas muito largas fazem a capacitância predominar sobre a indutância. A combinação dessas indutâncias e capacitâncias implementa filtros passa baixa e rejeita faixa, como mostram as Figuras 9 e 10.

Figura 9: Filtro passa baixa



Fonte: (ALVES, 2007)

Figura 10: Filtro Rejeita Banda

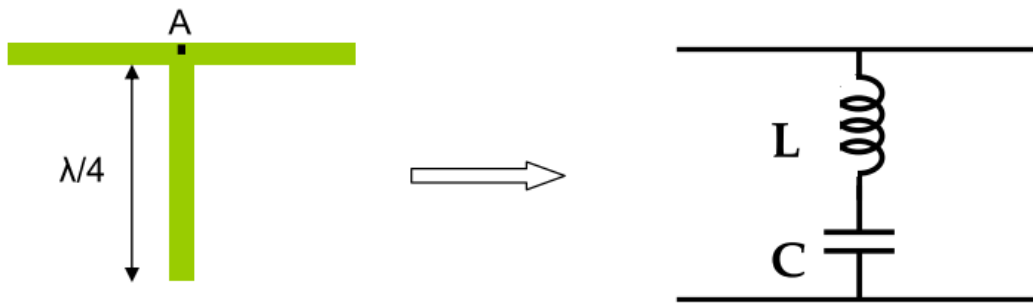


Fonte: (ALVES, 2007)

Por outro lado, utilizando *stubs* de comprimento $\lambda/4$ é possível rejeitar ou permitir a passagem de uma banda. Se o *stub* estiver terminado em vazio, a sua impedância de entrada comporta-se como um circuito LC série e se estiver terminado em curto-circuito, a sua

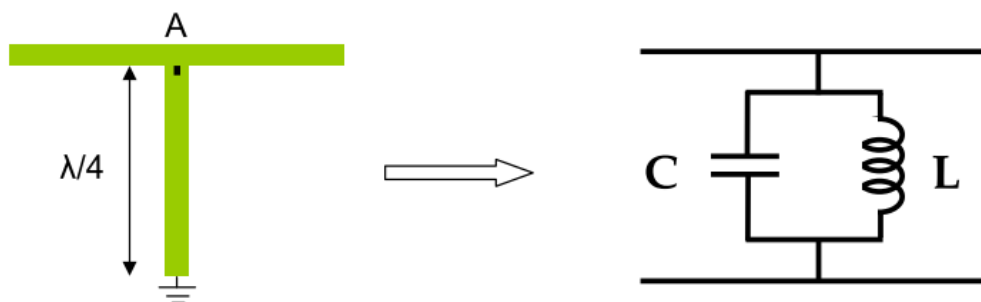
impedância de entrada comporta-se como um LC paralelo. Dessa forma, permite a obtenção de filtros rejeita faixa e passa faixa respectivamente, como mostram as figuras 11 e 12 (ALVES, 2007).

Figura 11: *Stub* Terminado em Vazio = Filtro Rejeita Faixa



Fonte: (ALVES, 2007)

Figura 12: *Stub* terminado em curto-circuito = Filtro Passa Faixa



Fonte: (ALVES, 2007)

3 METODOLOGIA

Baseado no estudo bibliográfico apresentado, foi possível dar início ao projeto dos filtros planares. Foram implementados três modelos de filtro, de topologias arbitrárias, de acordo com o passo a passo descrito abaixo.

3.1 Topologias dos filtros construídos

3.1.1 Ressorador

O primeiro modelo de filtro construído foi o filtro passa faixa com ressoador de anel retangular mostrado em Hsu (2005). As dimensões do ressoador foram adaptadas para corresponder ao material do substrato diferente utilizado e à frequência de operação dentro da faixa inferior de ISM (Industrial, Scientific and Medical), uma vez que as dimensões do filtro aumentam na medida que a constante dielétrica diminui, de acordo com as equações:

$$\frac{W}{h} = \frac{\left\{ \frac{[\exp(\frac{Z_0\sqrt{\epsilon_r+1}}{42,4}) - 1](7 + \frac{4}{\epsilon_r})}{11} + \frac{(1 + \frac{1}{\epsilon_r})}{0,81} \right\}}{\exp(\frac{Z_0\sqrt{\epsilon_r+1}}{42,4})} \quad (11)$$

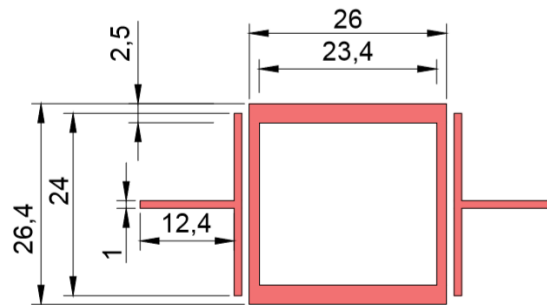
$$\lambda_m = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (12)$$

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} + 0,04 \left(\frac{1 - W}{h} \right)^2 \quad \text{para } \frac{W}{h} < 1 \quad (13)$$

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} \quad \text{para } \frac{W}{h} > 1 \quad (14)$$

A Figura 13 mostra o modelo de ressoador utilizado, com suas dimensões resultantes.

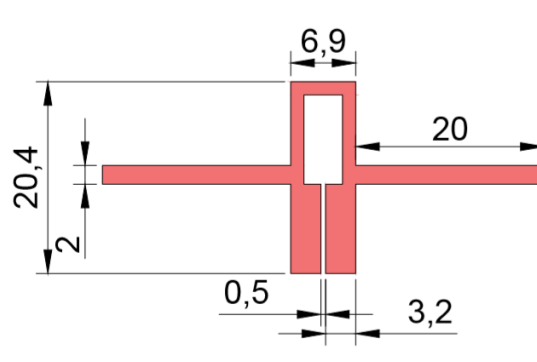
Figura 13: Dimensões do ressoador em anel retangular



Fonte: Autoria Própria (2019)

O segundo modelo, consiste em um filtro passa baixa com um simples ressoador *hairpin* SIR, modelado por (ROMANI, 2006). Novamente aqui, as dimensões do filtro foram modificadas, de acordo com as características do substrato utilizado, como feito para o primeiro modelo. As dimensões obtidas para o modelo são mostradas na Figura 14.

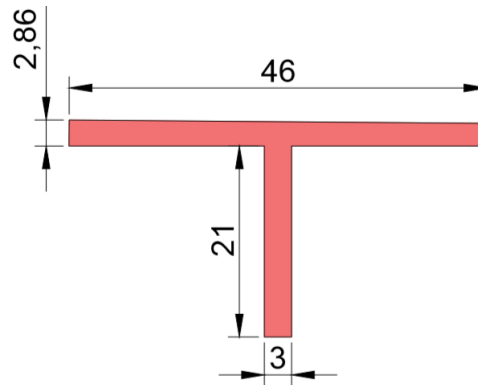
Figura 14: Dimensões do ressoador *hairpin*



Fonte: Autoria Própria (2019)

O terceiro filtro construído foi o de ressoador *stub* a vazio (RAMOS; JUNIOR; FEITOSA, 2017). As dimensões foram adaptadas de maneira análoga às anteriores (Figura 15).

Figura 15: Dimensões ressoador stub



Fonte: Autoria Própria (2019)

3.2 Características do substrato

De acordo com Serrano (2007), a escolha do material do substrato tem grande influência no projeto do filtro, em parâmetros como as dimensões e a resposta em frequência. O critério de escolha do material do substrato deve considerar suas características elétricas, facilidade de aquisição e processamento na fabricação de filtro. Considerando esses dois últimos itens, o material utilizado foi o termoplástico Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), que é comumente utilizado na técnica de impressão 3D. Os parâmetros do ABS foram obtidos através de caracterização em laboratório, em concordância com a faixa aceitável de variação mostrada em (RF CAFE, [s.d.]). A Tabela 1 mostra os parâmetros obtidos através da caracterização do substrato de ABS.

Tabela 1: Caracterização do ABS

Altura h	1.5 mm
Permissividade Elétrica ϵ_r	2,62
Tangente de Perdas $tg\delta$	0,0051

Fonte: Autoria Própria (2019)

3.3 Simulações dos Filtros

Após definidas as dimensões do filtro e características do substrato, foram feitas simulações da resposta dos filtros para as dimensões e parâmetros estabelecidos, a fim de analisar o coeficiente de transmissão o de reflexão, e assim verificar a viabilidade de construção dos filtros. O software utilizado para a realização das simulações foi o *Ansoft HFSS®*.

3.4 Construção dos filtros

3.4.1 Material e equipamento utilizado

Os equipamentos e materiais utilizados para a montagem dos filtros, foram:

- Impressora 3D Prusa;
- Filamento de ABS;
- Acetona 100%;
- Estilete;
- Cortadora de Papel *Silhouette*;
- Folha adesiva de cobre;
- Conector SMA;
- Equipamento de solda;
- Paquímetro digital.

3.4.2 Métodos de construção

Foram realizados dois métodos de construção distintos para cada protótipo, a fim de verificar a influência do resultado final do acabamento dos filtros, bem como identificar as melhores técnicas de confecção.

3.4.2.1 Filtro passa faixa

No primeiro método de construção, utilizado para o modelo passa faixa, o substrato foi impresso com uma pequena profundidade de dimensões e formato igual ao do ressoador. A

folha adesiva de cobre foi colada sobre toda a face superior do substrato, de forma que se encaixasse no formato do ressoador. O restante da folha adesiva que estava fora do encaixe, foi cortado com um estilete. Em seguida, a fita adesiva de cobre foi colada sobre toda a face inferior do substrato, dando forma ao plano de terra. Em seguida, foram soldados os conectores em cada uma das portas.

Após a impressão do substrato, percebe-se que a peça apresenta certa rugosidade, devido às características do método de impressão. Procurando observar a influência do acabamento do substrato, foi montado um segundo filtro, igual ao anterior, mudando apenas o acabamento. O mesmo procedimento foi seguido para a montagem com uma pequena diferença: após a impressão do substrato, antes de colar a fita de cobre, o substrato foi submetido à ação da acetona, de forma a melhorar o aspecto final da peça do filtro.

3.4.2.2 Filtros passa baixa e rejeita faixa

A construção do filtro passa baixa e do rejeita faixa foi realizada de maneira diferente da apresentada para os filtros passa faixa, desta vez o substrato foi impresso de maneira uniforme e o ressoador foi cortado em seu formato de uso, com a cortadora de papel *silhouette*. Em seguida foram feitas demarcações com ajuda de caneta e um paquímetro digital sobre a face superior do substrato, para que fosse colado o adesivo de cobre. O restante do processo de montagem aconteceu de forma análoga ao do filtro passa faixa.

O filtro passa baixa e o rejeita faixa foram montados com a mesma técnica, de acordo com o procedimento descrito, sendo que cada um dos modelos foi construído com e sem o acabamento em acetona.

3.5 Testes

Após a construção dos filtros, foi possível realizar a análise do comportamento da sua resposta à frequência, com a utilização de um analisador de rede vetorial (VNA), que mede a razão entre o sinal refletido e o sinal incidente (S_{11}), e a relação entre o sinal transmitido e o sinal incidente (S_{21}) (WENTWORTH, 2009). O equipamento utilizado para essa medição foi o

MiniVNA Tiny (Figura 16), que mostra o comportamento da resposta em frequência dos filtros na faixa de 1 MHz a 3 GHz.

Figura 16: MiniVNA Tiny



Fonte: Autoria Própria (2019)

Obtidos os dados de medição do VNA, pôde-se realizar a comparação com os dados de simulação do HFSS. Os filtros foram medidos na faixa de frequência de 1 GHz a 3 GHz. Os resultados serão mostrados na seguinte seção.

4. RESULTADOS

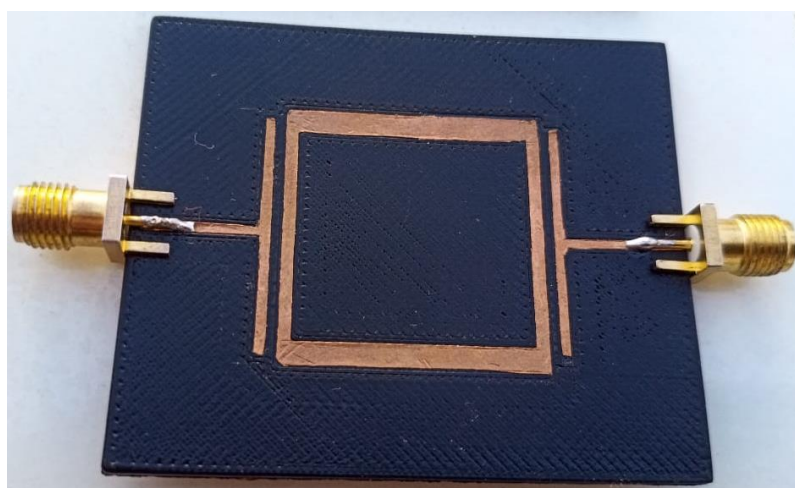
4.1 Filtro Passa Faixa com Anel Ressorador Retangular

Será mostrada inicialmente a análise do primeiro modelo construído, o filtro passa faixa. A Figura 17 mostra o resultado final dos filtros construídos, sendo o filtro da Figura 17(a) o dito rugoso e o da Figura 17(b), com acabamento em acetona.

Figura 17: Filtros Passa Faixa : (a) rugoso; (b) acabamento em acetona



(a)



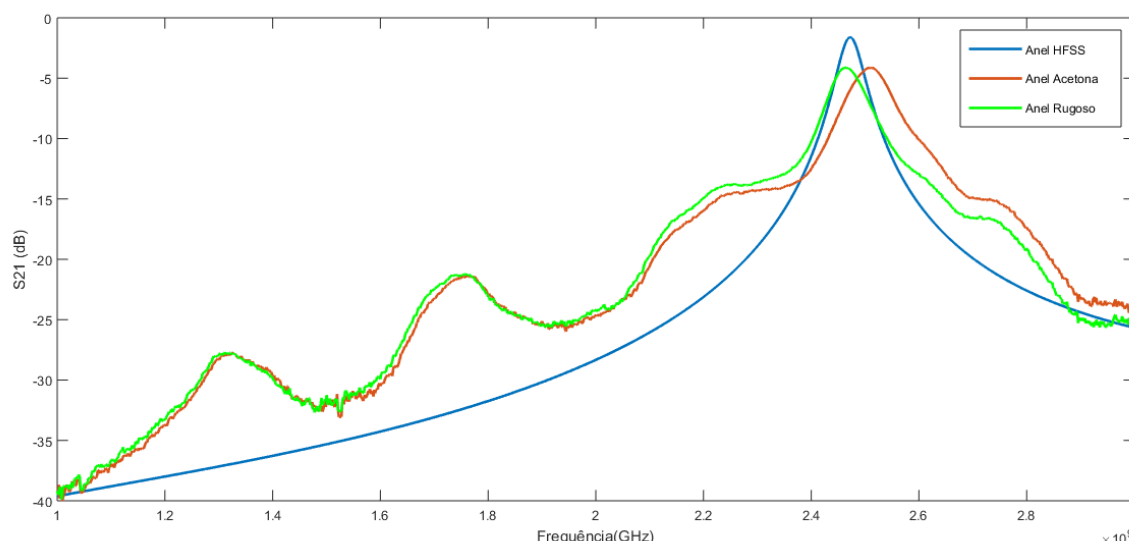
(b)

Fonte: Autoria Própria (2019)

Para este primeiro método de construção, foram identificadas algumas pequenas imprecisões e falha na colagem do ressonador, uma vez que a técnica de colagem não permite uma deposição perfeita do cobre no encaixe, sem que haja desgaste nas fitas.

Para analisar esses filtros, foram utilizados os dados obtidos por meio da simulação feita no HFSS, juntamente com os dados de medição do VNA para os filtros com e sem acabamento em acetona. O Gráfico 1 mostra o comportamento da resposta em frequência obtida em cada caso.

Gráfico 1: Curvas de Resposta do filtro em anel.



Fonte: Autoria Própria (2019)

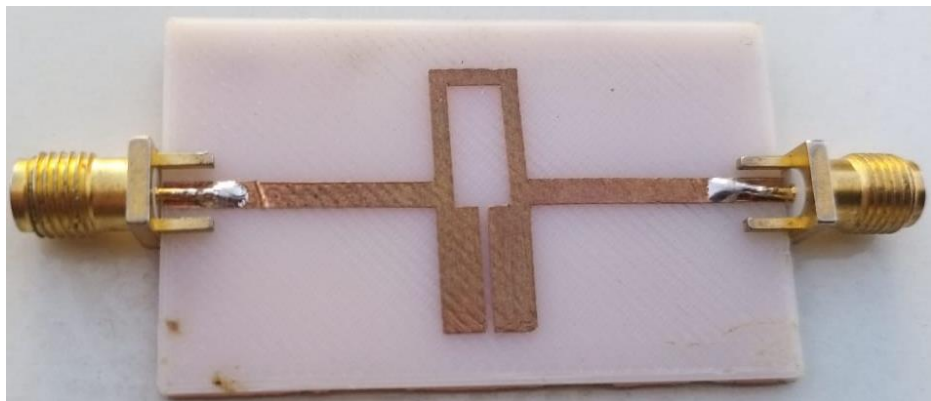
Observando no gráfico 1 a curva do filtro simulado, é possível perceber um comportamento de filtro passa faixa, com uma frequência de ressonância de aproximadamente 2,47 GHz, com perda de -2 dB e transmitindo totalmente frequências na faixa de 2,42 a 2,52 GHz. Comparado a este, o gráfico do filtro rugoso apresenta comportamento semelhante, embora mostre pequenas ondulações nas bandas de rejeição. A frequência de ressonância é aproximadamente igual à simulada, 2,47 GHz, dessa vez com perda próxima de -4 dB. Por fim, a curva do filtro acabado em acetona mostra um comportamento muito próximo ao do filtro rugoso, com as mesmas ondulações nas bandas de rejeição, e um pequeno deslocamento da frequência de ressonância em relação aos anteriores, de 2,47 para 2,51 GHz, para uma perda de aproximadamente -4 dB.

Pode-se dizer que as curvas de resposta desse filtro apresentaram correspondência considerável entre si, e embora o comportamento dos filtros construídos tenha sido muito parecido, o filtro rugoso obteve maior concordância com o filtro simulado. De maneira geral, os resultados para este protótipo foram consideravelmente satisfatórios.

4.2 Filtro Passa Baixa *hairpin* SIR

Os filtros *hairpin* construídos são mostrados na Figura 18, onde o filtro da Figura 18(a) é o filtro rugoso e o da Figura 18(b), acabado em acetona. A utilização da silhouette para o corte do ressoador, facilitou bastante o processo de montagem desse filtro, em comparação ao anterior, resultante assim em medidas mais precisas. A dificuldade apresentada nessa técnica diz respeito ao ato de colar o ressoador na posição correta no substrato. Como pode ser visto na figura abaixo, o ressoador da esquerda está muito bem posicionado e o da direita está levemente torto.

Figura 18: Filtros Passa Baixa *hairpin* : (a) rugoso; (b) acabamento em acetona.



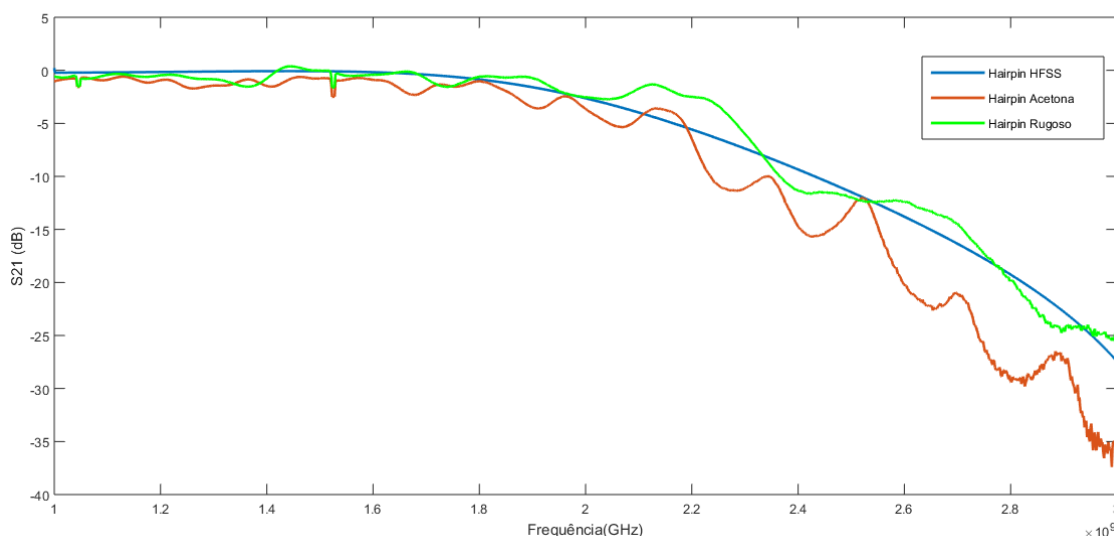
(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2019)

Semelhantemente ao anterior, a análise do comportamento do filtro passa baixa *hairpin* é feita a partir dos dados mostrados abaixo no Gráfico 2.

Gráfico 2: Curvas de resposta do filtro *hairpin*

Fonte: Autoria Própria (2019)

A curva do filtro simulado no Gráfico 2, revela um comportamento de filtro passa baixa, com uma frequência de corte de aproximadamente 2 GHz a -3 dB. O filtro acabado em acetona permanece na mesma frequência de corte enquanto que o filtro rugoso estende um pouco essa frequência para perto de 2,25 GHz.

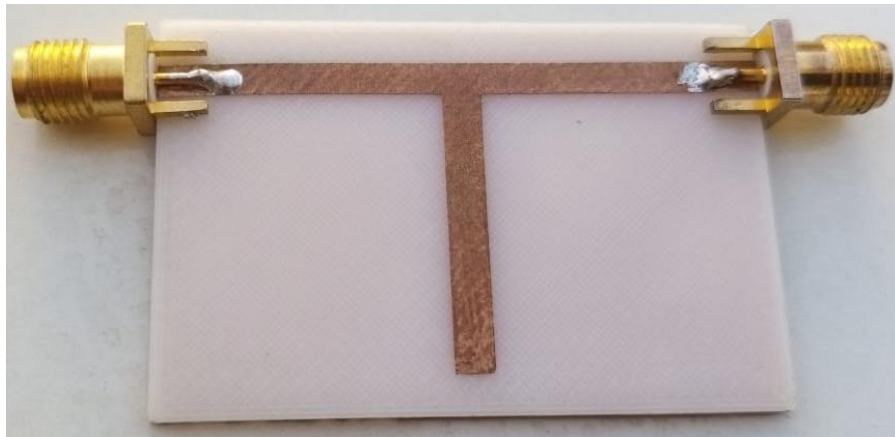
Voltando para a análise de filtro simulado pode-se perceber que o mesmo apresenta uma atenuação relativamente fraca, mesmo na banda de rejeição. Esse comportamento se repete nos filtros construídos, embora que a região de atenuação do filtro com acabamento tenha mostrado mais ondulações que a do rugoso.

As curvas de resposta desse filtro também apresentaram correspondência considerável entre si e de maneira geral, os resultados para este protótipo foram satisfatórios para a análise.

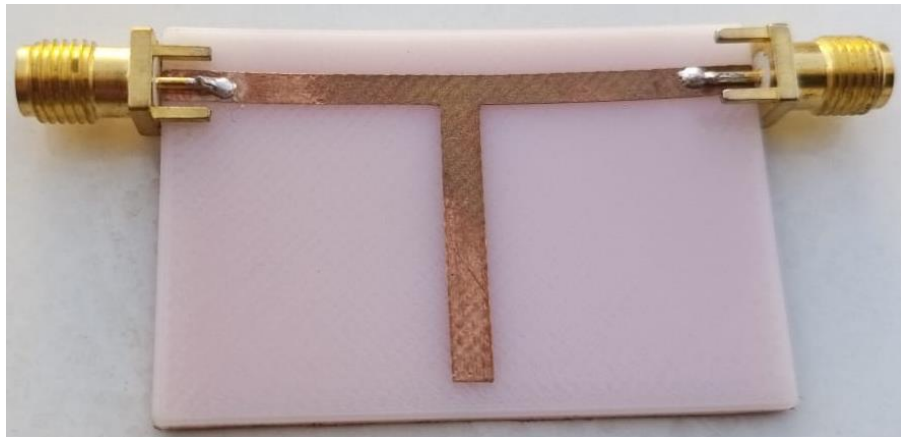
4.3 Filtro Rejeita Faixa *stub* a vazio

A Figura 19 mostra o filtro *stub* construído, com acabamento (Figura 19(a)) e sem acabamento (Figura 19(b)). A forma sem abertura do filtro resultou numa colagem mais precisa, em comparação ao filtro *hairpin*. Esse resultado foi possível devido à simplicidade da geometria do ressoador, que não apresenta espaçamentos ou *gaps*.

Figura 19: Filtros stub passa baixa rugoso e acabado em acetona



(a)

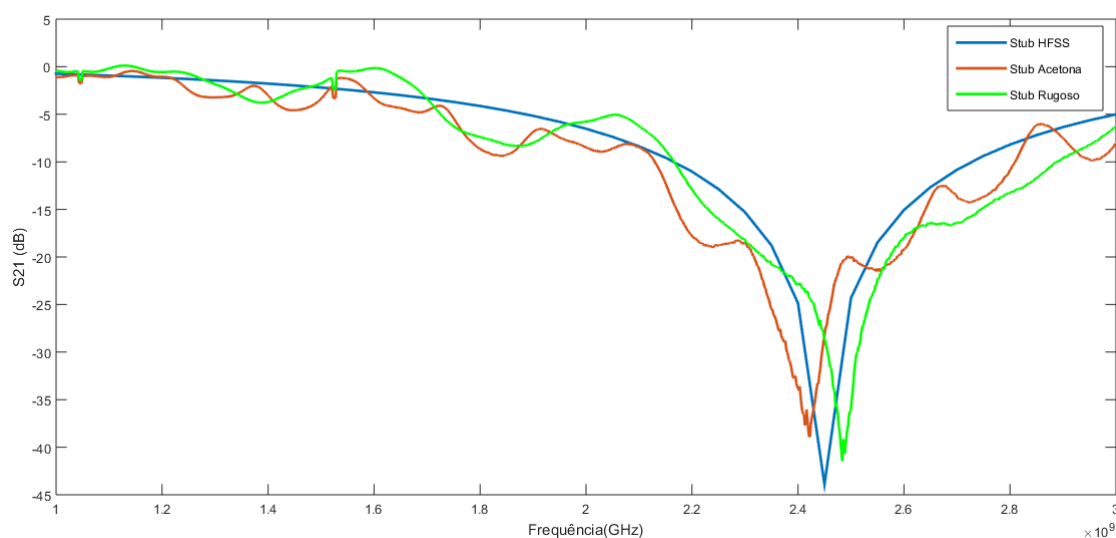


(b)

Fonte: Autoria Própria (2019)

Finalmente, o desempenho deste filtro é analisado, por meio do comportamento dos coeficientes de reflexão mostrados no Gráfico 3.

Observa-se no gráfico 3 que a curva do filtro simulado no HFSS mostra um comportamento de filtro rejeita faixa, com uma frequência de ressonância de aproximadamente 2,45 GHz em -43 dB, com uma faixa de rejeição a -25 dB de 2,40 a 2,50 GHz. A curva do filtro rugoso, desloca a frequência central de rejeição para a direita em aproximadamente 2,49 GHz a -41 dB, enquanto que a curva do filtro com substrato acabado desloca para a esquerda, com frequência de ressonância agora em 2,42 GHz a -38 dB.

Gráfico 3: Curvas de resposta do filtro *stub*.

Fonte: Autoria Própria (2019)

As curvas de resposta desse filtro apresentaram correspondência considerável entre si, com pequenas variações entre o projeto simulado e os filtros construídos. Então, pode-se dizer que os resultados analisados foram satisfatórios.

5 CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi verificar o funcionamento de filtros planares de microfita que utilizassem na sua construção, substratos de ABS construídos em impressora 3D. Foram simulados e executados três modelos de filtro, projetados para diferentes respostas em frequência: passa faixa, passa baixa e rejeita faixa. Em seguida foi feita a análise das curvas de reposta dos filtros, simulado e construídos, para cada um dos modelos executados.

Para cada um dos três modelos citados, foram construídos dois filtros, um com o seu substrato polido com acetona e o outro sem modificar a estrutura do substrato impresso. A partir daí pôde-se verificar que há poucas diferenças entre as repostas de frequência do filtro liso e do rugoso, sendo que para cada caso, os resultados medidos no VNA corresponderam ao resultado apresentado no HFSS, apresentando pequenas variações. Foi percebido também que o método de corte com a silhouette, se mostrou mais eficiente, tanto em economia de tempo como na aparência final dos filtros, embora que este método ainda precise de aprimoramento quanto à deposição do ressoador no substrato.

No geral, os resultados obtidos comprovam a viabilidade da confecção de dispositivos para RF e microondas que utilizam de manufatura aditiva na sua produção. Além disso, esse estudo abre portas para uma continuidade de experiências utilizando novos materiais que se apliquem a outras técnicas de manufatura aditiva, como também desperta o interesse na criação de outros dispositivos planares, como antenas, superfícies seletivas de frequência e acopladores.

A importância deste trabalho se apoia no fato de que, introduzir a utilização da impressão em 3D de substratos poliméricos, na confecção dos filtros planares em microfita, aumenta a possibilidade de aplicação desses filtros nos diversos sistemas de comunicação, promovendo, assim uma contribuição de grande relevância nas pesquisas dessa área.

REFERÊNCIAS

ALVES, C. R. **Um novo filtro de microondas com dupla banda passante utilizando ressoadores miniaturizados**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília/ Df, 2007.

BAHR, R. et al. **RF characterization of 3D printed flexible materials-NinjaFlex Filaments**. European Microwave Week 2015: “Freedom Through Microwaves”, EuMW 2015 - Conference Proceedings; 2015 45th European Microwave Conference Proceedings, EuMC. **Anais...2015**Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7345870>>. Acesso em: 30 jul. 2019

BALANIS, C. A. **Antenna Theory**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

COLLIN, R. E. **Foundations for Microwave Engineering**. 2. ed. New York, New Jersey: IEEE, John Wiley & Sons, 2001.

DEFFENBAUGH, P. I.; RUMPF, R. C.; CHURCH, K. H. Broadband microwave frequency characterization of 3-d printed materials. **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, 2013.

FRANÇA, R. R. C. DE. **Dispositivos planares integrados utilizando método dinâmico com metamateriais e PGB**. Dissertação (doutorado) - Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grando do Norte, Natal/RN,2012.

GÓES, T. P. R. **Técnica de Projeto de Filtros Passa-Faixa Multibanda Baseada em Circuitos Multirressonantes**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica,2013. Disponível em: <<http://www.ppgee.eng.ufba.br/teses/a2a2f6b0a19ad446fcc8bf76a77b4972.pdf>>

GOMEZ-GARCIA, R. et al. Flexible filters: Reconfigurable-bandwidth bandpass planar filters with ultralarge tuning ratio. **IEEE Microwave Magazine**, v. 15, n. 5, p. 43–54, 2014.

HONG, J.; LANCASTER, M. J. **Microstrip Filters for RF / Microwave**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2001. v. 7

HSU, C. H. et al. **Microstrip rectangular ring bandpass filter design using high permittivity substrate**. Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC. **Anais...2005**Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1607063>>. Acesso em: 5 ago. 2019

MARIANO, J. G. DE O. **Implementação de filtros planares baseados na geometria matrisoska**. Dissertação (mestrado) - Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa/PB, 2017. Disponível em: <[http://repositorio.ifpb.edu.br/jspui/bitstream/177683/298/1/34-Josefa Gilliane de Oliveira Mariano - IMPLEMENTAÇÃO DE FILTROS PLANARES BASEADOS NA GEOMETRIA MATRIOSKA.pdf](http://repositorio.ifpb.edu.br/jspui/bitstream/177683/298/1/34-Josefa%20Gilliane%20de%20Oliveira%20Mariano%20-%20IMPLEMENTA%C3%87%C3%83O%20DE%20FILTROS%20PLANARES%20BASEADOS%20NA%20GEOMETRIA%20MATRIOSKA.pdf)>

MARTINEZ, H. G. et al. **Additive Manufacturing Techniques Applied to the Design of**

Radio Frequency Planar Circuits. Proceedings - 2019 UNSA International Symposium on Communications, UNSA ISCOMM 2019. **Anais...**2019Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8712825>>. Acesso em: 30 jul. 2019

MINERVINO, D. R. **Desenvolvimento de Estruturas Integradas de Filtros e Antenas para Aplicações em Sistemas de Comunicação sem fio.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

MUSSOI, F. L. R. **Resposta em Frequência: Filtros Passivos** Florianópolis, 2004. Disponível em: <<https://intranet.ctism.ufsm.br/gsec/Apostilas/filtropassivo.pdf>>

NASCIMENTO, J. **Telecomunicações.** 2. ed. São Paulo: Pearson Education, 2000.

NETO, V. S. Filtros. In: **Telecomunicações: Sistemas de Modulação: uma visão sistêmica.** 3. ed. São Paulo: Érica, 2012.

OLIVEIRA, W. M. M. DE. **Análise de Filtros Planares sobre substratos têxteis.** Trabalho de Conclusão de Curso - Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural Do Semi árido, Caraúbas, 2018.

POZAR, D. M. **Microwave Engeneering.** 4. ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2012.

RAMOS, B.; JUNIOR, I.; FEITOSA, N. **Projeto e Desenvolvimento de um Filtro em linhas de Microfita utilizando o simulador QUCS.** n. 2, p. 23–25, 2017.

RF CAFE. **Dielectric Constant, Strength, & Loss Tangent.** Disponível em: <<http://www.rfcafe.com/references/electrical/dielectric-constants-strengths.htm>>. Acesso em: 7 ago. 2019.

ROMANI, I. N. A. **Síntese de Filtros de Microondas Compactos com Respostas Elípticas e Pseudo- elípticas utilizando a Variável Transformada Z.** Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Tecnologia, Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília/ Df, 2006.

SADIKU, M. N. O. **Matthew N. O. Sadiku.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SASAKI, C. M.; OSHIRO, L. K. **Kit didático para a implementação de filtros passivos e ativos.** Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Industrial Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SENGUPTA, D. L.; LIEPA, V. V. **Applied and Electromagnetics and Eletromagnetic Compatibility.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

SERRANO, A. M. C. L. C. **Projeto de filtros de micro-ondas passa-faixa planares utilizando ressoadores patch dual-mode.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, São Paulo, 2007.

WENTWORTH, S. M. **Eletromagnetismo Aplicado: Abordagem antecipada das linhas de transmissão.** Porto Alegre: Bookman, 2009.

ZULUAGA, S. M. Y. Desenvolvimento de Filtro Passa-Faixa Banda Larga com Zeros de Transmissão para Sistemas de Comunicação Ultra-Wideband. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Tecnologia, Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília/ Df, 2007.