



**UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO**



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Eletrônica e Sistemas



Graduação em Engenharia Eletrônica

Camila da Silva Cavalcanti

**Filtro rejeita-faixa de micro-ondas com estrutura de
“T” invertido**

Recife

2024

Camila da Silva Cavalcanti

Filtro rejeita-faixa de micro-ondas com estrutura de “T” invertido

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a): Prof. Marcos Tavares de Melo, Ph.D.

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Cavalcanti, Camila da Silva .

Filtro rejeita-faixa de micro-ondas com estrutura de T invertido / Camila da
Silva Cavalcanti. - Recife, 2023.

59p : il., tab.

Orientador(a): Marcos Tavares Melo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Eletrônica -
Bacharelado, 2023.

9.

1. Micro-ondas. 2. Filtro rejeita-faixa. 3. Microfita. 4. Modelo "T"
invertido. I. Melo, Marcos Tavares . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Camila da Silva Cavalcanti

Filtro rejeita-faixa de micro-ondas com estrutura de “T” invertido

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovado em: 13/12/2023

Banca Examinadora

Prof. Marcos Tavares de Melo, Ph.D.
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo, D.Sc.
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Hermano Andrade Cabral, Ph.D.
Universidade Federal de Pernambuco

Agradecimentos

Agradeço a Deus por todas as coisas, pela inteligência e disposição, pelo fortalecimento diário, por abrir as portas para poder estudar neste curso em uma universidade federal.

Agradeço aos meus pais Ana e Flávio que sempre me apoiaram, que sempre se esforçaram para que eu e meus irmãos pudéssemos ter a melhor educação, me ajudaram e forneceram tudo que eu precisava para permanecer no curso, escutaram minhas angústias e me fortaleceram, sempre com muito amor, sempre esperando o melhor de mim.

Agradeço aos meus irmãos Tiago e André que sempre foram meus exemplos, as pessoas mais incríveis e inteligentes, sempre me ajudando com minhas dúvidas da faculdade, mesmo quando não sabiam procuravam para me ajudar.

Agradeço à minha avó Ana pelas orações, pelo ânimo. Agradeço à minha tia Rejane pelo apoio e incentivo. Agradeço a meus amigos que estiveram comigo ajudando, escutavam as minhas queixas. Agradeço à minha psicóloga Luciene que me ajudou a superar muitos obstáculos, que me escutou falar da faculdade na maioria das sessões.

Agradeço aos meus colegas de curso que sempre estavam dispostos a ajudar, em especial cito Larissa, Thamires, Cristiane e Iasmim. Agradeço por todos os professores que tive durante o curso. Agradeço ao Professor Marcos Tavares por ter aberto vaga de estágio no Laboratório de micro-ondas. Agradeço à minha colega de laboratório Amanda, que me ajudou muito na conclusão do curso, obrigada pelas risadas e ensinamentos.

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Eletrônica e Sistemas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica(Eng.)

Filtro rejeita-faixa de micro-ondas com estrutura de “T” invertido

Camila da Silva Cavalcanti

O trabalho apresenta um modelo de um dispositivo microfita de filtro rejeita-faixa micro-ondas que possui a estrutura em forma de “T” invertido e que funciona na faixa de frequências de 1 GHz à 3 GHz. Em trabalhos anteriores, a conexão em forma de “T” se mostrou útil na otimização de certos parâmetros de filtros, e por esta razão foi utilizado neste trabalho. A partir do modelo de filtro com estrutura de ”T” invertido foram simuladas e fabricadas duas estruturas variando alguns parâmetros de comprimento. Foram analisados os resultados, e discutido o efeito das variações das dimensões no resultado final. No trabalho é apresentado o método de fotolitografia que foi utilizado para a fabricação das placa de circuito impresso das estruturas do projeto.

Palavras-chave: micro-ondas; filtro rejeita-faixa; microfita, modelo ”T” invertido.

Abstract of Course Conclusion Work, presented to Department of Electronic and Systems, as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Electronic Engineering(Eng.)

Microwave reject-band filter with o inverted "T" structure

Camila da Silva Cavalcanti

This work presents a model of a microstrip microwave bandstop filter device that has an inverted "T" shape structure and operates in the frequency range of 1 GHz to 3 GHz. In previous works, the "T" shaped connection to be useful in optimizing certain filter parameters, and for this reason, it was used in this work. Based on the model of the bandstop filter with an inverted "T" structure, two structures were simulated and manufactured by varying some length parameters. The results were analyzed, and the effect of dimension variations on the final result was discussed. The work also presents the photolithography method used for the fabrication of the printed circuit board of the project's structures.

Keywords: microwave; reject-band filter; microstrip; Inverted "T" model.

Lista de figuras

2.1	Espectro eletromagnético	17
2.2	Unidade de comprimento de fios paralelos e a equivalência no modelo de circuito concentrado.	19
2.3	Impedância do circuito equivalente	20
2.4	Admitância do circuito equivalente	20
2.5	Rede de duas portas	22
2.6	Resposta passa-baixa Chebyshev	25
2.7	Exemplo de um filtro rejeita banda	26
2.8	Resposta de um filtro rejeita-faixa	26
2.9	Estrutura de microfita	27
3.1	Plastificadora A4	34
3.2	Reveladora e Gravadora de Telas de Silk Screen a Vácuo	34
3.3	Botões da mesa da Luz UV.	36
3.4	Tela do temporizador	36
4.1	Circuito equivalente de microfita para o circuito RLC da estrutura "T" invertido	39
4.2	Modelo do filtro e variáveis utilizadas	39
4.3	Analisador de micro-ondas	43
4.4	kit de calibração utilizado na medição	44
4.5	kit de calibração utilizado na medição aberto	44
4.6	Medição da estrutura	45

5.1	Simulação da estrutura 1	46
5.2	Simulação da estrutura 2	46
5.3	Resultado de coeficiente de transmissão por frequência da simulação da estrutura 1	47
5.4	Resultado de perda de retorno por frequência da simulação da estrutura 1 .	47
5.5	Resultado de coeficiente de transmissão por frequência da simulação da estrutura 2	47
5.6	Resultado de perda de retorno por frequência da simulação da estrutura 2 .	48
5.7	Fotomáscara usada na fabricação da placa de circuito impresso da estrutura 1	48
5.8	Fotomáscara usada na fabricação da placa de circuito impresso da estrutura 2	48
5.9	Placa de circuito impresso da estrutura 1	49
5.10	Placa de circuito impresso da estrutura 2	49
5.11	Resultado de coeficiente de transmissão por frequência da medição da estrutura 1	50
5.12	Resultado de perda de retorno por frequência da medição da estrutura 1 .	50
5.13	Resultado de coeficiente de transmissão por frequência da medição da estrutura 2	51
5.14	Resultado de perda de retorno por frequência da medição da estrutura 2 .	51
6.1	Comparação dos dados simulados e medidos de coeficiente de transmissão por frequência da estrutura 1	53
6.2	Comparação dos dados simulados e medidos de coeficiente de transmissão por frequência da estrutura 2	54
6.3	Comparação dos dados simulados e medidos de perda de retorno por frequência da estrutura 1	54
6.4	Comparação dos dados simulados e medidos de perda de retorno por frequência da estrutura 2	55

Lista de Tabelas

2.1	Bandas de frequências de micro-ondas	18
2.2	Valores típicos da impedância característica para vários tipos de estrutura	31
4.1	Pontos do modelo na Figura 4.2 em milímetros	40
4.2	Variáveis das estruturas 1 e 2 em milímetros	41

Lista de abreviatura e símbolos

R	..... Resistência elétrica
L	..... Indutância elétrica
G	..... Condutância elétrica
C	..... Capacitância elétrica
Z	..... Impedância elétrica
Y	..... Admitância elétrica
α	..... constante de atenuação
β	..... constante de fase
ω	..... Frequência angular
Z_0	..... Impedância característica
dB	..... decibéis
ϵ	..... Constante de ripple
$F_n(\Omega)$	Função de filtragem ou característica
Ω	..... variável de frequência
W	..... Largura da microfita
L	..... Comprimento da microfita
t	..... Espessura da microfita
ϵ_r	Constante de permissividade relativa
h	..... Espessura do substrato
TEM	.... Transversal Eletromagnético

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Objetivo Geral	14
1.1.1	Objetivos específicos	15
1.2	Organização do TCC	15
2	Fundamentação Teórica	17
2.1	Micro-ondas	17
2.2	Linha de transmissão	19
2.2.1	Impedância característica	19
2.3	Parâmetros S	22
2.4	Filtros	24
2.4.1	Função de transferência de filtros	24
2.4.2	Resposta do filtro Chebyshev	25
2.4.3	Filtro Rejeita-faixa	26
2.5	Microfita	27
2.5.1	Aproximação Quase-TEM para microfita	27
3	Processo de fabricação de placa de circuito impresso por fotolitografia	32
3.1	Resumo	32
3.2	Materiais e equipamentos	33
3.2.1	Materiais	33
3.2.2	Equipamentos	33
3.3	Etapas de fabricação	34

	12
3.3.1	Preparação da Fotomáscara 34
3.3.2	Colocação da película na placa (<i>Dry film</i>) 35
3.3.3	Fotolitografia 35
3.3.4	Retirada de parte do <i>dry film</i> 37
3.3.5	Corrosão 37
3.3.6	Retirado do resto do <i>dry film</i> 37
4	Metodologia 38
4.1	Simulação 41
4.2	Fabricação 41
4.3	Medição 41
5	Desenvolvimento 46
5.1	Simulação 46
5.2	Fabricação 48
5.3	Medição 50
6	Resultados 52
7	Conclusão 56
	Referências 57

Capítulo 1

Introdução

As ondas eletromagnéticas de micro-ondas estão presentes no dia-a-dia de qualquer pessoa, seja com o forno micro-ondas, seja com o wi-fi de casa ou da empresa. Aplicações como comunicação sem fio, sistemas de radares, comunicações via satélite, sensores de movimento são exemplos da ampla utilidade do espectro micro-ondas para a sociedade atual.

Para qualquer sistema que utilize sinais em frequências de micro-ondas, é essencial o uso de filtros, as quais filtram e selecionam frequências. Estes evitam interferências, melhoram a qualidade do sinal e maximizam a eficiência dos sistemas.

O filtro rejeita-faixa em micro-ondas desempenha um papel essencial ao atenuar ou rejeitar sinais em uma faixa de frequências específica, sendo fundamental em diversas aplicações práticas. Ele contribui significativamente para a proteção de sistemas sensíveis, prevenindo a saturação ou distorção do sinal em sistemas de comunicação, satélites e equipamentos de radar. Ao otimizar o espectro eletromagnético mediante a rejeição de faixas específicas de frequências, o filtro possibilita o uso eficiente do espectro limitado disponível. A capacidade de reduzir ruídos e componentes harmônicos indesejados aprimora a pureza do sinal, promovendo uma comunicação mais eficaz. Destaca-se também por sua importância na supressão de interferências em ambientes de comunicação com dispositivos operando em diversas bandas de frequências. Desta forma, a presença desse filtro é fundamental para garantir a qualidade, confiabilidade e eficiência das comunicações em sistemas de micro-ondas.

O artigo (ZHU et al. 2016) apresenta um modelo de filtro que possui conexão paralela em forma de "T" invertido, o que resultou em vantagens no resultado final em comparação a outros filtros que não possuíam esta conexão. Entre as vantagens percebidas estão redução da perda de inserção, limitação da passagem parasita na banda de parada, redução da área total do filtro e uma transição de banda mais acentuada. Pela razão das otimizações observadas em (ZHU et al. 2016) foi adotado para este projeto a conexão em forma de "T" invertido para um filtro rejeita-faixa.

Neste projeto a faixa de frequências de 1 GHz a 3 GHz foi escolhida para trabalhar por ser atraente para muitas aplicações devido a uma boa combinação de características de propagação de sinal e largura de banda disponível. Alguns exemplos da utilização do intervalo de 1 GHz a 3 GHz são :

- Comunicações sem fio: As Redes de telefonia móvel, como 4G e 5G, operam em faixas distintas de frequências, incluindo entre 1 GHz e 3 GHz.
- Redes Wi-Fi: Podem operar as redes Wi-Fi em frequências na faixa de 1 GHz a 3 GHz, principalmente em configurações mais antigas como as redes Wi-Fi 802.11b/g.
- Radar: exemplos de radares que atuam nessa faixa de frequências são os radares meteorológicos e radares de vigilância.
- Comunicações via satélite: Com frequência, satélites de comunicação empregam faixas de frequências entre 1 GHz e 3 GHz para enviar sinais de dados e voz.

1.1 Objetivo Geral

Projetar e fabricar filtro rejeita-faixa de micro-ondas utilizando o *design* com conexão paralela de "T" invertido que funcione no intervalo de 1 GHz 3 GHz.

1.1.1 Objetivos específicos

- realizar o estudo teórico sobre sinais eletromagnéticos de micro-ondas, sobre filtros e microfitas;
- projetar modelo de circuitos de filtro para uma estrutura de microfita;
- estabelecer valores de variáveis de dimensões para duas estruturas.
- simular os circuitos projetados;
- fabricar duas estruturas filtro rejeita-faixa de micro-ondas utilizando o *design* com conexão paralela de "T" invertido que funcione no intervalo de 1 GHz 3 GHz.;
- medir com analisador de micro-ondas as estruturas produzidas;
- analisar os resultados obtidos;
- discutir possíveis melhorias;

1.2 Organização do TCC

O conteúdo deste TCC está dividido em seis capítulos. As referências encontram-se nas páginas finais. A seguir, um resumo dos capítulos seguintes do TCC.

Capítulo 2. Apresenta a revisão da fundamentação teórica com os assuntos necessários para a realização deste trabalho.

Capítulo 3. Apresenta o método de fabricação de circuito impresso utilizado para fabricar os dispositivos desenvolvidos neste projeto.

Capítulo 4. Apresenta a metodologia utilizada em cada etapa do trabalho.

Capítulo 5. Apresenta o desenvolvimento de cada etapa do trabalho.

Capítulo 6. Apresenta os resultados da simulação e compara com os resultados medidos das 2 estruturas fabricadas, e apresenta uma discussão sobre as diferenças entre os resultados obtidos.

Capítulo 7. Apresenta a conclusão do trabalho.

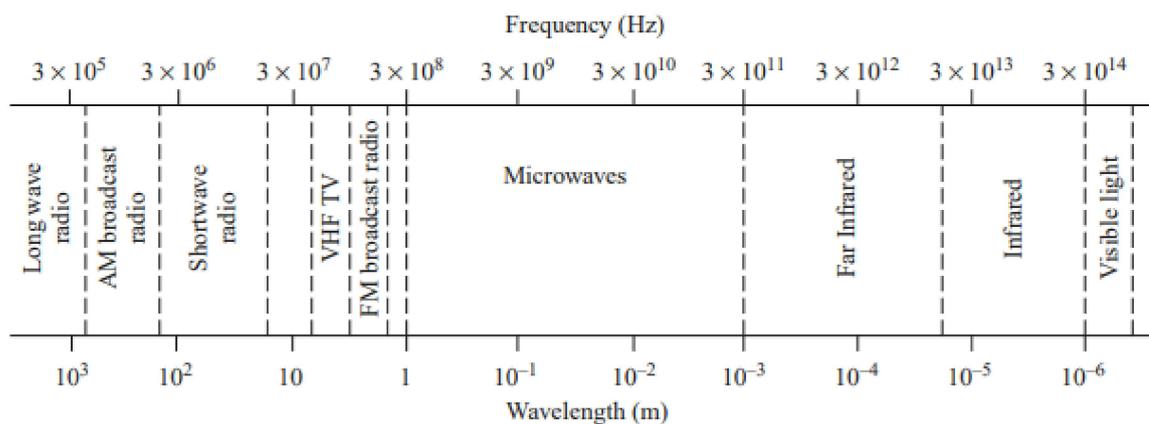
Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Micro-ondas

Micro-ondas se refere as ondas eletromagnéticas no intervalo de frequência de 300 MHz a 300 GHz, e de comprimento entre 1 mm à 1 m. Na figura 2.1 pode ser observada a posição do intervalos de frequências e de comprimento de onda de micro-ondas no espectro eletromagnético.

Figura 2.1: Espectro eletromagnético



Fonte: POZAR, 2012

Devido às características de alta frequência e de curto comprimento de onda, a análise do circuito de micro-ondas não pode ser feita a partir da teoria de circuito para parâmetros concentrados, no entanto é necessário análise mais detalhada a partir das equações de

Maxwell. Em razão dessas características os sistemas de micro-ondas apresentam certos comportamentos que possibilitam ampla aplicação tecnológica, por exemplo:

- Ao contrário de sinais de frequências mais baixas, sinais de micro-ondas não refletem na ionosfera e viajam pela linha de visão, de maneira que é possível *links* de comunicação com grande capacidade terrestre e via satélite.
- O tamanho da antena é inversamente proporcional à frequência transmitida, desta forma as antenas de micro-ondas são menores. Frequências mais altas podem obter mais largura de banda e maior taxa de transmissão de dados.

Algumas aplicações práticas de micro-ondas são os sistemas de radar, redes sem fio, forno de micro-ondas, comunicação ponto a ponto.

A tabela 2.1 apresenta as bandas de frequências de micro-ondas.

Tabela 2.1: Bandas de frequências de micro-ondas

Aproximações de designações de banda	Frequência	Comprimento de Onda
Ultra high frequency (UHF)	300 MHz a 3 GHz	100cm a 1m
L	1 a 2GHz	15 cm a 30 cm
S	2 a 4 GHz	7,5cm a 15cm
C	4 a 8 GHz	3,75 cm a 7,5 cm
X	8 a 12 GHz	25 mm a 37,5 mm
K_u	12 a 18 GHz	16,7 mm a 25 mm
K	18 a 26,5 GHz	11,3 mm a 16,7 mm
K_a	26,5 a 40GHz	5,0 mm a 11,3 mm
Q	33 a 50GHz	6,0 mm a 9,0 mm
U	40 a 60 GHz	5,0 mm a 7,5 mm
V	50 a 75 GHz	4,0 mm a 6,0 mm
W	75 a 110 GHz	2,7 mm a 4,0 mm
F	90 a 140 GHz	2,1 mm a 3,3 mm
D	110 a 170 GHz	1,8 mm a 2,7 mm

Fonte: WIKIPEDIA, microwave.

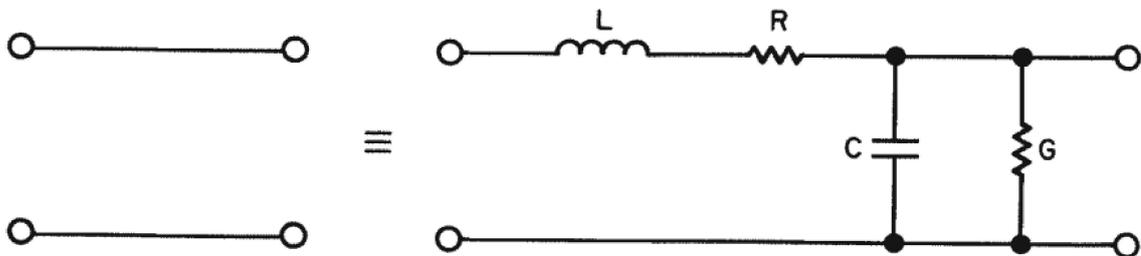
2.2 Linha de transmissão

Transportar sinais com frequência superior a 30 kHz em cabos elétricos causam uma perda elevada de potência, já que a energia tende a irradiar para fora, ou até mesmo refletir em direção à fonte, desta forma se faz necessário um meio de transmissão especializado para que não haja perdas significativas. As linhas de transmissão são estruturas projetadas para conduzir ondas eletromagnéticas de frequências altas, de rádio ou superior. A maioria tem dois condutores separados por um isolante, chamado de dielétrico.

2.2.1 Impedância característica

Para analisar a linha de transmissão pode ser considerado um trecho, e realizar a análise a partir de um circuito concentrado equivalente. Pode ser observado na figura 2.2 um exemplo de trecho de unidade de comprimento de fios paralelos e a equivalência no modelo de circuito concentrado.

Figura 2.2: Unidade de comprimento de fios paralelos e a equivalência no modelo de circuito concentrado.



Fonte: ADAM; HEWLETT, 1969.

Onde:

R - Resistência, em Ω/m

L - Indutância, em H/m

G - Condutância, em S/m

C - Capacitância, em F/m

Aplica-se a lei de Kirchhoff para obter os resultados de impedância e de admitância, para a impedância a análise ocorre com a entrada em curto-circuito, assim como pode ser

visto na figura 2.3, e para a admitância a análise ocorre com a saída em circuito aberto, assim como pode ser visto na figura 2.4. Desta forma, se obtém os seguintes resultados:

$$Z = R + j\omega L \quad (2.1)$$

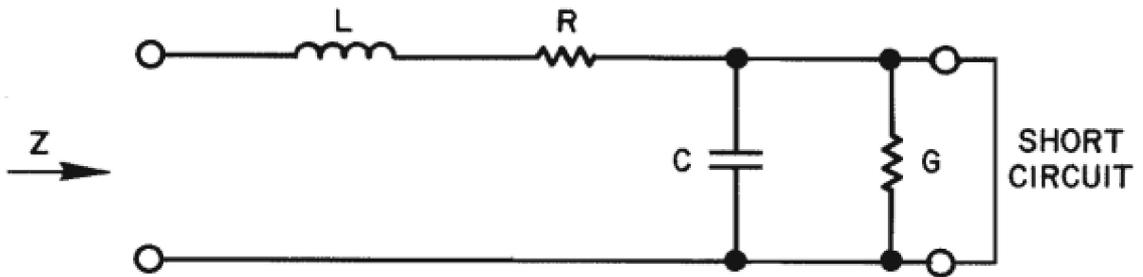
$$Y = G + j\omega C \quad (2.2)$$

Onde:

Z - Impedância

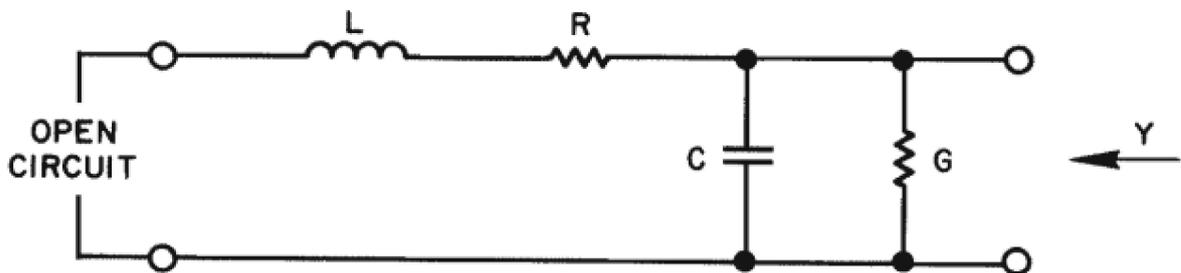
Y - Admitância

Figura 2.3: Impedância do circuito equivalente



Fonte: ADAM; HEWLETT, 1969.

Figura 2.4: Admitância do circuito equivalente



Fonte: ADAM; HEWLETT, 1969.

A constante de propagação é possível ser definida a partir da impedância e da admitância:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{ZY} \quad (2.3)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.4)$$

Onde:

α - constante de atenuação

β - constante de fase

ω - Frequência angular

A maior parte das linha de transmissão possuem as dimensões da seção transversal uniformes ao longo de sua extensão, de maneira a possuir uma impedância sem variação, que é chamada de impedância característica, que é referenciado por Z_0 . A impedância característica também é possível se obter a partir das equações 2.1 e 2.2.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.5)$$

Na maioria dos casos as perdas ao longo de uma linha de transmissão são muito pequenas, o que permitem ser ignoradas, de maneira que $R = G = 0$ e a constante de atenuação é zero . Assim as equações 2.4 e 2.5:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{LC} \quad (2.6)$$

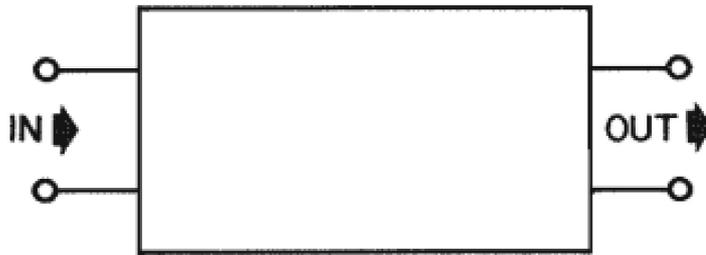
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.7)$$

Desta forma a impedância característica se torna independente da mudança de frequência.

2.3 Parâmetros S

Os parâmetros de espalhamentos, ou parâmetros S, são usados para descrever a energia através de redes de micro-ondas com n portas. Para a análise da rede com n portas pode ser considerada uma caixa preta com as portas de entrada e saída, como por exemplo na figura 2.5, já que não importa o que há dentro mas os sinais de entrada e saídas. Há dois tipos de parâmetros S, o coeficiente de transmissão, que se refere ao comportamento de uma porta ao receber um sinal que entrou por outra porta, e o coeficiente de reflexão ou perda de retorno, aos quais se referem a parcela de sinal refletido em uma determinada porta.

Figura 2.5: Rede de duas portas



Fonte: ADAM; HEWLETT, 1969.

Os parâmetros S são organizados em uma matriz $n \times n$, para uma rede de n portas, chamada de matriz de espalhamento, ou matriz S, em que S_{ij} é coeficiente de reflexão quando $i = j$, e coeficiente de transmissão quando $i \neq j$. Seja as variáveis a_i e b_j referentes às magnitudes da onda em cada porta normalizada pela impedância característica, podendo serem por exemplo valores de tensão. a_i se refere à onda incidente na porta i, e b_j , que se refere à onda refletida na porta j. Desta forma, a matriz S para um sistema

com n portas tem a forma:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2.8a)$$

Ou

$$[b] = [S][a] \quad (2.8b)$$

Cada elemento da matriz de espalhamento é obtido por:

$$S_{ij} = \left. \frac{b_i}{a_j} \right|_{a=0 \text{ para } k \neq j} \quad (2.9)$$

Os parâmetros S costumam ser valores complexos, e pode ser mais prático representá-los em termos da sua magnitude e fase:

$$S_{ij} = |S_{ij}|e^{j\theta_{ij}} \quad (2.10)$$

Para a magnitude de S_{ij} em decibéis (dB):

$$|S_{ij}|_{dB} = 20 \log |S_{ij}| \quad (2.11)$$

2.4 Filtros

2.4.1 Função de transferência de filtros

A função de transferência de uma rede de filtros de duas portas é uma representação matemática das características de resposta da rede, geralmente expressa como uma fórmula matemática que descreve S_{21} . Na maioria dos cenários, a amplitude quadrática da função de transferência de uma rede de filtro passivo sem perdas é definida como (HONG; LANCASTER, 2001):

$$|S_{21}(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 F_n^2(\Omega)} \quad (2.12)$$

Em que:

ϵ - Constante de *ripple*

$F_n(\Omega)$ - Função de filtragem ou característica

Ω - variável de frequência

Para uma rede invariante no tempo, a função de transferência deve ser especificada como uma função racional (HONG; LANCASTER, 2001):

$$S_{12}(p) = \frac{N(p)}{D(p)} \quad (2.13)$$

Em que $N(p)$ e $D(p)$ são polinômios em uma variável de frequência complexa $p = \sigma + j\Omega$. Para uma rede passiva sem perdas, a frequência de neper (fator de amortecimento) $\sigma = 0$ e $p = j\Omega$ (HONG; LANCASTER, 2001).

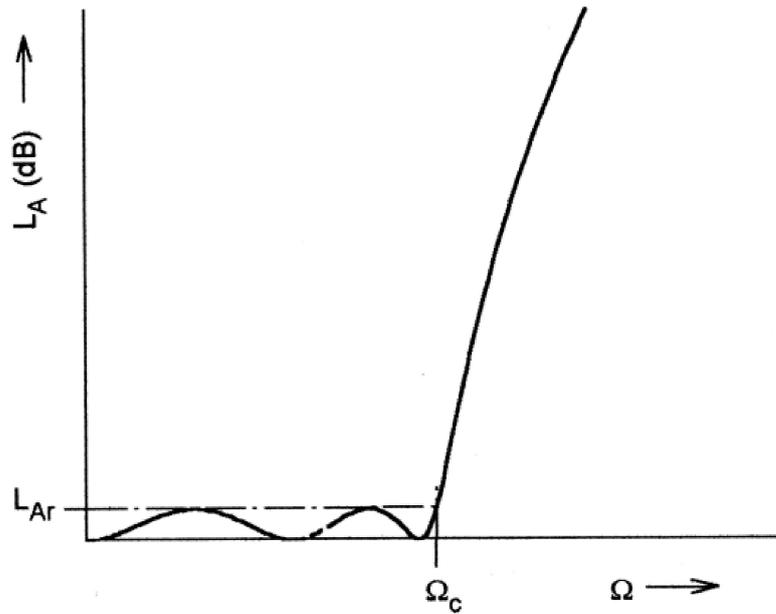
Para uma certa função de transferência da 2.12, a resposta de perda por inserção do filtro, pode ser calculada por (HONG; LANCASTER, 2001) :

$$L_A(\Omega) = 10 \log \frac{1}{|S_{21}(j\Omega)|^2} \text{dB} \quad (2.14)$$

2.4.2 Resposta do filtro Chebyshev

A Figura 2.6 apresenta a resposta Chebyshev, o qual possui na faixa de passagem ondulações iguais.

Figura 2.6: Resposta passa-baixa Chebyshev



Fonte: HONG; LANCASTER, 2001.

A função de transferência ao quadrado da amplitude que caracteriza esse tipo de resposta é a seguinte (HONG; LANCASTER, 2001):

$$|S_{21}(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 T_n^2(\Omega)} \quad (2.15)$$

Em que a constante de *ripple* ϵ é relativa a uma dada ondulação da banda de passagem L_{Ar} em dB por (HONG; LANCASTER, 2001):

$$\epsilon = \sqrt{10^{\frac{L_{Ar}}{10}} - 1} \quad (2.16)$$

$T_n(\Omega)$ é a função Chebyshev do tipo 1 de ordem n definida por HONG; LANCASTER, 2001:

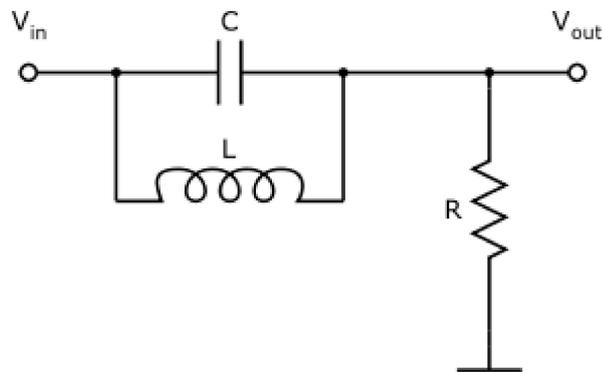
$$T_n(\Omega) = \begin{cases} \cos(n \cdot \cos^{-1}\Omega) & |\Omega| \leq 1 \\ \cosh(n \cdot \cos^{-1}\Omega) & |\Omega| \geq 1 \end{cases} \quad (2.17)$$

2.4.3 Filtro Rejeita-faixa

Um Filtro rejeita-faixa, ou rejeita-banda, impede a passagem de sinal em determinada faixa de frequências, e permite em todas as outras frequências. Um exemplo do uso desse filtro é quando se há a necessidade de eliminar ruídos indesejados e interferências, e preservando a integridade das frequências desejadas.

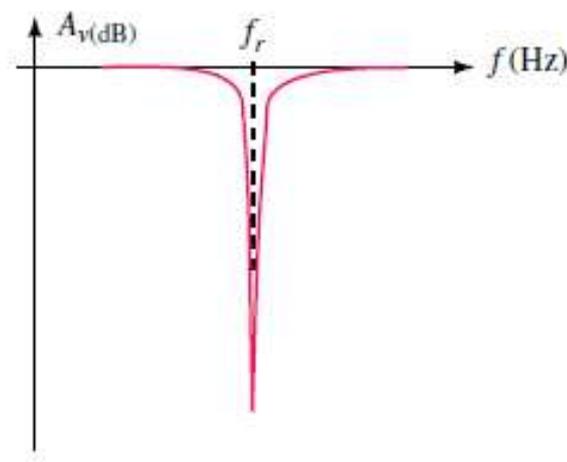
A figura 2.7 apresenta o exemplo de um circuito rejeita-faixa, e na figura 2.8 mostra a resposta em frequência do filtro rejeita-faixa.

Figura 2.7: Exemplo de um filtro rejeita banda



Fonte: WIKIPEDIA, [filtrorejeitafaixa](#). **Filtro rejeita-faixa**

Figura 2.8: Resposta de um filtro rejeita-faixa



Fonte: SINTONIA_FINA. **Rejeita-Faixa**

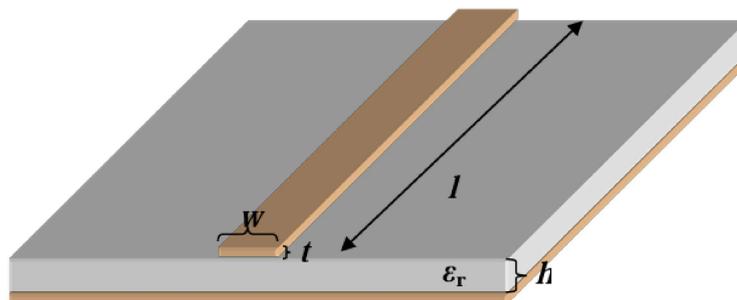
2.5 Microfita

Microfita é uma estrutura de linha de transmissão planar, ou seja, as dimensões no plano definem as características do dispositivo, como por exemplo a largura da fita que determina a impedância característica. Uma vantagem de dispositivos de microfita é que podem ser fabricados por técnicas de circuito impresso.

O modo de propagação de uma estrutura em microfita é quase-TEM, que na análise pode ser aproximado com precisão pelo modo TEM, e possibilita que haja uma transição simples para circuitos coaxiais.

A Figura 2.9 contém a estrutura geral de uma linha de transmissão de microfita. Pode-se observar uma fita condutora de largura W , comprimento L e espessura t , sobre um substrato de constante de permissividade relativa ϵ_r e espessura h . Na base do substrato há o plano terra.

Figura 2.9: Estrutura de microfita



Fonte: Pontes, 2020.

2.5.1 Aproximação Quase-TEM para microfita

Em uma estrutura de microfita os campos elétrico e magnético permeiam por dois meios, o ar e o dielétrico, de forma a não suportar uma onda puramente TEM, já que a velocidade de propagação é determinada somente pelas propriedades do material, como permissividade e permeabilidade. Porém por causa dos dois meios de propagação, a velocidade de propagação também é influenciada pelas dimensões físicas específicas da microfita.

As componentes longitudinal dos campos pode ser desprezadas, dado que são de dimensão muito inferior as componentes transversais, de tal modo a se comportar como o modo TEM, que é a aproximação quase-TEM. Esta aproximação é verdadeira para a maior parte das faixas de frequência operacional da microfita. É possível a linha de transmissão microfita ser analisada através da aproximação quase-estática.

O parâmetro fundamental de uma linha de transmissão é a sua impedância característica. Em uma linha de transmissão onde o modo dominante é o TEM puro, a impedância característica pode ser representada pelas equações a seguir:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = v_p L = \frac{1}{v_p C} \quad (2.18)$$

Sendo:

L - indutância/unidade de comprimento da linha

C - capacitância/unidade de comprimento da linha

v_p - Velocidade de fase de onda

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.19)$$

Ao substituímos o dielétrico pelo ar na microfita, terá uma linha em que a onda se propagará com a velocidade da luz, $c \approx 3 \cdot 10^8 m/s$. A impedância característica para essa linha, preenchida pelo ar, pode ser calculada utilizando qualquer uma das expressões a seguir:

$$Z_{0a} = \sqrt{\frac{L}{C_a}} = cL = \frac{1}{cC_a} \quad (2.20)$$

Na qual L permanece constante, pois a permeabilidade no meio não sofre modificação quando ocorre a substituição do dielétrico pelo ar. C_a representa a capacitância por unidade de comprimento da linha preenchida pelo ar. A partir das Equações 2.18 e 2.20, deriva a seguinte expressão:

$$Z_0 = \frac{1}{c\sqrt{CC_a}} \quad (2.21)$$

Na equação 2.21 é possível observar que a partir dos valores da capacitância por unidade de comprimento para microfita com e sem a presença do substrato, é possível calcular a impedância com base nas medidas da estrutura.

Um meio homogêneo com permissividade elétrica efetiva substitui o substrato e o ar na aproximação quase-estática. A velocidade de propagação de uma linha de transmissão preenchida pelo ar é calculada por :

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC_a}} \quad (2.22)$$

A permissividade elétrica efetiva é dada por :

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{C}{C_a} = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 \quad (2.23)$$

Relacionando Z_0, Z_{0a} e ϵ_{eff} :

$$Z_0 = \frac{Z_{0a}}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.24)$$

A permissividade na linha de transmissão varia entre ϵ_r e $0,5(\epsilon_r - 1)$, pois em uma linha de transmissão com fita larga, a maior parte do campo elétrico se concentra entre a fita e o plano terra, de forma que a permissividade efetiva se aproxima do valor da permissividade relativa, assim $\epsilon_{\text{eff}} \approx \epsilon_r$. Já para uma linha de transmissão com uma fita mais fina, a distribuição do campo elétrico é quase igual entre o ar e o substrato, assim $\epsilon_{\text{eff}} \approx 0,5(\epsilon_r - 1)$ (PONTES, 2020).

O comprimento da onda guiada da linha na microfita é definido por:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.25)$$

Em que :

λ_0 - comprimento de onda no ar

λ_g - comprimento de onda na Microfita

Outra maneira de calcular o comprimento de onda que é mais frequentemente usada é:

$$\lambda_g = \frac{300}{F(\text{GHz})\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}(\text{mm}) \quad (2.26)$$

É determinado o comprimento elétrico θ , para um certo comprimento físico l , a partir de :

$$\theta = \beta l = \frac{2\pi l}{\lambda_g} \quad (2.27)$$

Em que :

β - constante de fase

Para calcular a impedância característica de uma linha de transmissão microfita há diferentes formas de análise. Para o cálculo a partir da análise quase-estática, existem expressões analíticas para a permissividade efetiva e a impedância característica de uma linha de microfita de espessura da trilha muito fina ($t \rightarrow 0$) com precisão melhor que 1%, as expressões estão em função das dimensões da linha e do material do substrato.

Para $W/h \leq 1$ (HONG; LANCASTER, 2001):

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0,04 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right] \quad (2.28)$$

e

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + 0,25 \frac{W}{h} \right) \quad (2.29)$$

Já para $W/h > 1$ (HONG; LANCASTER, 2001):

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.30)$$

e

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \left[\frac{W}{h} + 1,393 + 0,677 \ln \left(\frac{W}{h} - 1,444 \right) \right]^{-1} \quad (2.31)$$

Na tabela 2.2 pode ser visto alguns tipos de estruturas e os intervalos de impedância característica típicos.

Tabela 2.2: Valores típicos da impedância característica para vários tipos de estrutura

Tipos de estrutura	Impedância características $Z_0(\Omega)$
Microfita	20 - 125
Microfita invertida	25 - 130
Microfita invertida fechada	30 - 140
Stripline suspenso	40 - 150
Linha coplanar(CPW)	40 - 150
Slotline	60 - 200
Finline	10 - 400
ImageLine	≈ 26

Fonte: BEZERRA, 2006.

Capítulo 3

Processo de fabricação de placa de circuito impresso por fotolitografia

3.1 Resumo

Para a técnica de Fotolitografia de fabricação de circuito impresso, é revestida a placa com material plástico fotossensível, que ao ser exposto à luz UV se torna mais resistente, ou seja, um material fotoresistivo.

É necessário o negativo da estrutura do circuito que se deseja imprimir, para que quando for exposta a placa com o material fotoresistente à luz UV, a parte do circuito escureça, tornando a película mais resistente, e a parte ao redor do circuito permaneça mais clara. O negativo da estrutura é impresso em uma folha transparente, e se chama fotomáscara. A fotomáscara é colocada entre a placa e fonte de luz UV.

Após a exposição da placa à luz UV, é retirada a parte mais clara da película mergulhando a placa em uma mistura de água e barrilha hidroazul. A placa ficará com a área do metal a ser corroída exposta e a estrutura do circuito protegida pela película que se tornou mais resistente devido a exposição à luz UV. É colocada a placa no ácido que corrói a parte metálica exposta.

Após a corrosão é necessário que a placa seja colocada em uma mistura de água e soda cáustica a fim de ser retirada a parte da película mais resistente. Desta forma, se obtém

uma placa com um circuito impresso.

3.2 Materiais e equipamentos

3.2.1 Materiais

- Água
- Bacia de tamanho adequado para caber a placa
- Barrilha hidroazul (Barrilha de piscina)
- *Dry film* (película azul, escurece com luz UV)
- Soda Cáustica em escama
- Fita isolante
- Luvas
- Percloroeto de ferro
- Placa de cobre
- Transparência A4 (impressão a laser ou para jato de tinta)

3.2.2 Equipamentos

- Impressora
- Plastificadora A4. Na Figura 3.1 é apresentada a plastificadora usada no Laboratório
- Reveladora e Gravadora de Telas de Silk Screen a Vácuo (mesa de led UV). Na Figura 3.2 é apresentada a mesa de luz UV utilizada no Laboratório.

Figura 3.1: Plastificadora A4



Fonte: A autora (2023)

Figura 3.2: Reveladora e Gravadora de Telas de Silk Screen a Vácuo



Fonte: A autora (2023)

3.3 Etapas de fabricação

3.3.1 Preparação da Fotomáscara

1. Faça um arquivo com o negativo da estrutura que se deseja fabricar, ou seja, um arquivo que contenha em preto só a parte que se deseja remover, e em branco a

parte que tenha a estrutura.

2. Imprima em uma folha de papel A4 transparente, caso a impressão seja feita em uma impressora de jato de tinta, para reforçar a parte preta, imprimir mais duas ou três vezes. É importante a impressão fique bem escura para que na hora de expor à luz UV a parte coberta não permita que atravessa nenhuma luz.

3.3.2 Colocação da película na placa (*Dry film*)

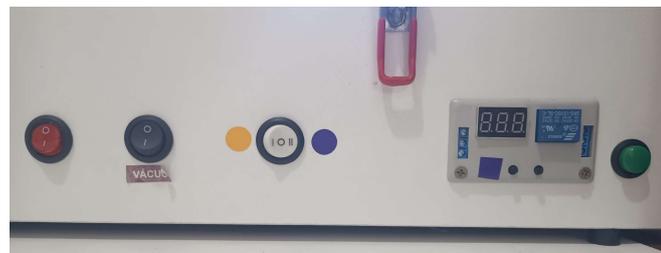
1. Corte o *dry film* no tamanho adequado, do tamanho da estrutura escolhida com uma margem.
2. O *dry film* tem dois plásticos de proteção dos dois lados, um deles precisa ser retirados para ser fixado a placa, e o outro após a exposição à luz UV.
3. Colocar pedaço de fita isolante para retirar um dos plásticos de proteção e colocar a parte do *dry film* sem plástico na superfície da placa, de forma que não haja bolhas de ar (usar um cartão no auxílio).
4. Colocar a placa com o *dry film* na plastificadora, duas vezes, ou mais.

3.3.3 Fotolitografia

1. Na Figura ?? possui os botões da mesa da Luz UV.
 - Interruptor vermelho -> ligar/desligar
 - Interruptor preto: Ligar/Desligar o vácuo
 - Interruptor Branco -> I->ligar a luz amarela, 0->desligar luzes, II->ligar luz UV
 - Botão verde-> ligar a tela do temporizador
 - Botões pretos-> ajustar o tempo.
2. Ligue a reveladora no botão vermelho.

3. Na mesa de led UV (vista na Figura 3.2) posicione a fotomáscara, coloque a placa com o *dry film* por cima, e feche a tampa. Pode ser ligada a luz amarela para ajudar a posicionar, ligando no interruptor branco na posição I, em que ao lado tem uma bola amarela para indicar.
4. Ligue o vácuo no interruptor preto
5. Selecione o II no interruptor branco (ao lado tem uma bola azul) e a tela do temporizador será ligado, podendo ser ajustado o tempo dos botão pretos abaixo da tela.
6. Aperte o botão verde para ligar a luz UV e ser ligada a contagem do temporizador. Quando o tempo acabar a luz UV será apagada.
7. Para retirar a placa desligue o vácuo e retire a placa com o *dry film* marcado.
8. Retirar o outro plástico, como o *dry film* está agora mais resistente, o plástico poderá ser retirado com facilidade.

Figura 3.3: Botões da mesa da Luz UV.



Fonte: A autora (2023)

Figura 3.4: Tela do temporizador



Fonte: A autora (2023)

3.3.4 Retirada de parte do *dry film*

1. Coloque as luvas para proteção
2. Na Bacia coloque água e Barrilha de piscina e coloque a placa nessa mistura.
3. Com um pincel passe levemente na superfície da placa, e assim a parte mais clara irá sair
4. Tire a placa da mistura quando a parte mais clara do *dry film* tiver sido retirado.

3.3.5 Corrosão

1. Permaneça com as luvas
2. Em uma bacia misture água com o percloroeto de ferro
3. Mergulhe a placa no ácido
4. Quando a corrosão acabar retire do ácido
5. Para retirar a o resto da película que ainda está sobre a placa coloque em uma bacia com a mistura de água e soda caustica.

3.3.6 Retirado do resto do *dry film*

1. Permaneça com as luvas
2. Para retirar o resto da película que ainda está sobre a placa coloque em uma bacia com a mistura de água e soda caustica.

Observação: Caso o *dry film* não tenha sido colocado de forma correto, haja muitas bolhas, ou no processo da exposição à luz UV não ter sido correta e necessite a retirada da película antes da corrosão, pode ser feita este processo antes.

Após a conclusão de todas as etapas se obtém assim uma placa com o circuito impresso desejado.

Capítulo 4

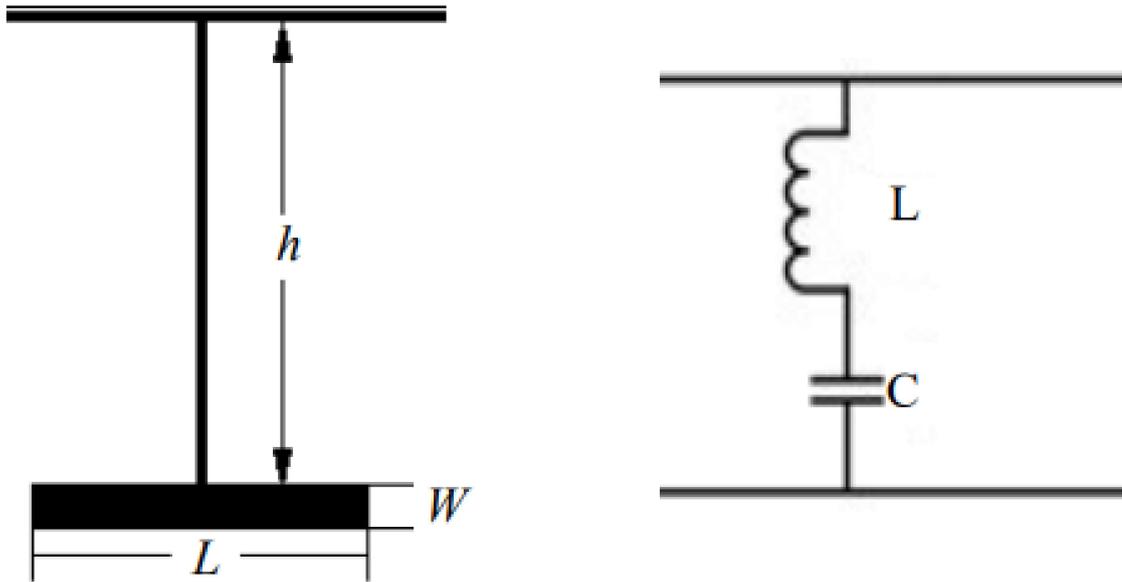
Metodologia

Para a fabricação do filtro, foi escolhido para o uso o substrato RO3010 da Rogers Corporation®, que possui propriedades específicas necessários para o desempenho desejado. Este substrato tem uma espessura de 1,27 mm e é caracterizado por uma constante dielétrica relativa de $\epsilon_r = 10,2$, além de uma baixa tangente de perda de 0,0022. Essas características são fundamentais para garantir a estabilidade e a eficiência do filtro, pois afetam diretamente as propriedades de propagação das ondas e a capacidade do filtro de atenuar frequências indesejadas.

A inspiração para o *design* do filtro foi o conceito proposto em (ZHU et al., 2016). O filtro adota a forma de um filtro de banda de rejeição em um arranjo em forma de "T" paralelo invertido baseado em geometria. Em sua estrutura, uma linha de transmissão principal assume a forma de um "T" invertido, em que a parte central do "T" é perpendicular à linha de transmissão principal. Esse arranjo resulta em uma impedância de carga paralela e, conseqüentemente, é classificado como um filtro paralelo (ZHU et al., 2016). O ramal em forma de "T" invertido age como um ramal de rejeição de sinal, projetado para atenuar ou rejeitar frequências específicas dentro da faixa de operação do filtro. Na figura 4.1 pode ser observado os ramos de circuito em microfita com a sua equivalência para um circuito RLC da estrutura de "T" invertido.

As dimensões precisas das linhas e da estrutura foram cuidadosamente selecionadas para garantir que a frequência de operação do sistema esteja dentro da faixa de 1 a 3 GHz.

Figura 4.1: Circuito equivalente de microfita para o circuito RLC da estrutura "T" invertido

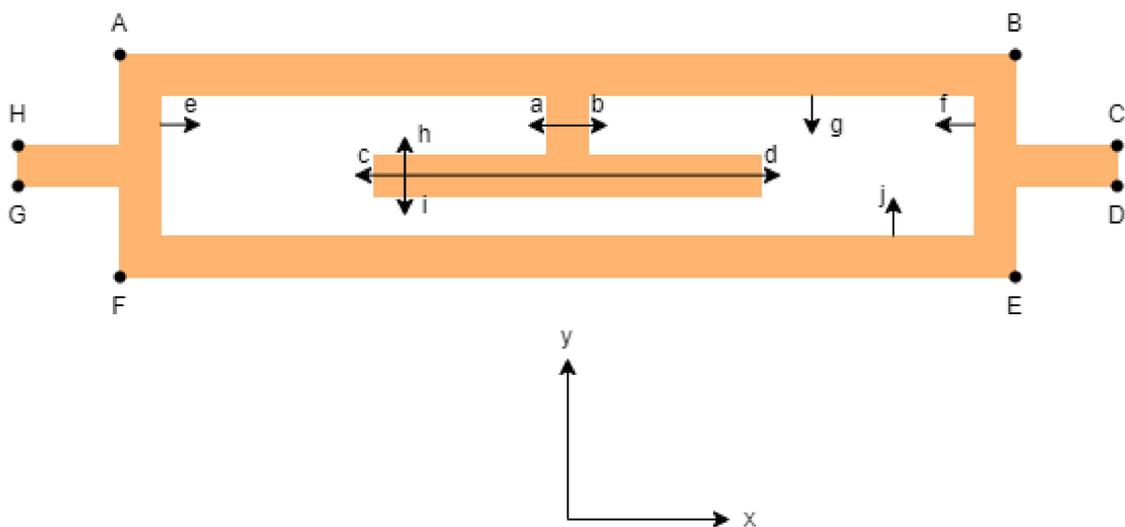


Fonte: ZHU et al., 2016

Na Figura 4.2, podem ser observadas dez variáveis de posição usadas na construção do filtro. A escolha dessas variáveis permite o ajuste fino do desempenho e das características do filtro de acordo com as especificações e requisitos desejados. A Tabela 4.1 contém pontos A, B, C, D, E, F, G e H do modelo na Figura 4.2 em milímetros.

O filtro possui uma largura de 10 mm e um comprimento de 40 mm. A linha de alimentação tem uma impedância de 50Ω .

Figura 4.2: Modelo do filtro e variáveis utilizadas



Fonte: A autora (2023)

Tabela 4.1: Pontos do modelo na Figura 4.2 em milímetros

	x	y
A	-15	1.4
B	15	1.4
C	20	0.58
D	20	-0.6
E	15	-1.6
F	-15	-1.6
G	-20	0.58
H	-20	-0.6

Fonte: A autora (2023)

Analisando de uma perspectiva 2D, as variáveis a, b, c, d, e, f, g, h, i e j equivalem a comprimentos na estrutura do filtro. Ao longo do eixo x variam a, b, c, d, e e f, já ao longo do eixo y variam as variáveis g, h, i e j. Para o *design* do filtro desempenham um papel fundamental essas variáveis, ditando suas propriedades geométricas e estabelecendo a disposição espacial de seus elementos.

Na simulação, foi definido como o ponto (0,0) no ponto ao meio da linha \overleftrightarrow{cd} . Varia na direção oposta ao eixo x o parâmetro "a", de forma a assumir valores negativos, já o parâmetro "b" varia na direção positiva do eixo x, de maneira a assumir valores positivos. Varia na direção positiva do eixo y a variável "h", já a variável "i" varia na direção oposta. A mesma ideia se aplica às outras seis variáveis. Nas simulações, foram adotados dois valores para cada variável, levando em consideração as limitações físicas do filtro.

Ao manipular essas dimensões a resposta em frequência do filtro, a largura de banda e outros parâmetros de desempenho podem ser ajustados para atender a objetivos de *design* específicos.

A partir do modelo visto na Figura 4.2 foram estabelecidos valores para as variáveis gerando duas estruturas distintas. A Tabela 4.2 contém os valores das variáveis das estruturas 1 e 2 em milímetros.

Tabela 4.2: Variáveis das estruturas 1 e 2 em milímetros

	Estrutura 1	Estrutura 2
a	-0,9	-0,6
b	1	0,7
c	-9	-8
d	7,5	7,5
e	-10	-11
f	9	11
g	0,8	0,8
h	0,4	0,3
i	-0,4	-0,3
j	-0,8	-0,6

Fonte: A autora (2023)

4.1 Simulação

O processo de construção do dispositivo envolveu a utilização do *software* de simulação eletromagnética 3D *Ansys HFSS*. Por meio dessa ferramenta, foi possível modelar e simular o funcionamento do dispositivo, levando em consideração uma variedade de parâmetros e variáveis.

4.2 Fabricação

Após a simulação, foram fabricadas as placas de circuito impresso das estruturas projetadas de microfita pelo processo de fotolitografia descrito no capítulo 3. A fabricação foi realizada no Laboratório de micro-ondas da Universidade Federal de Pernambuco.

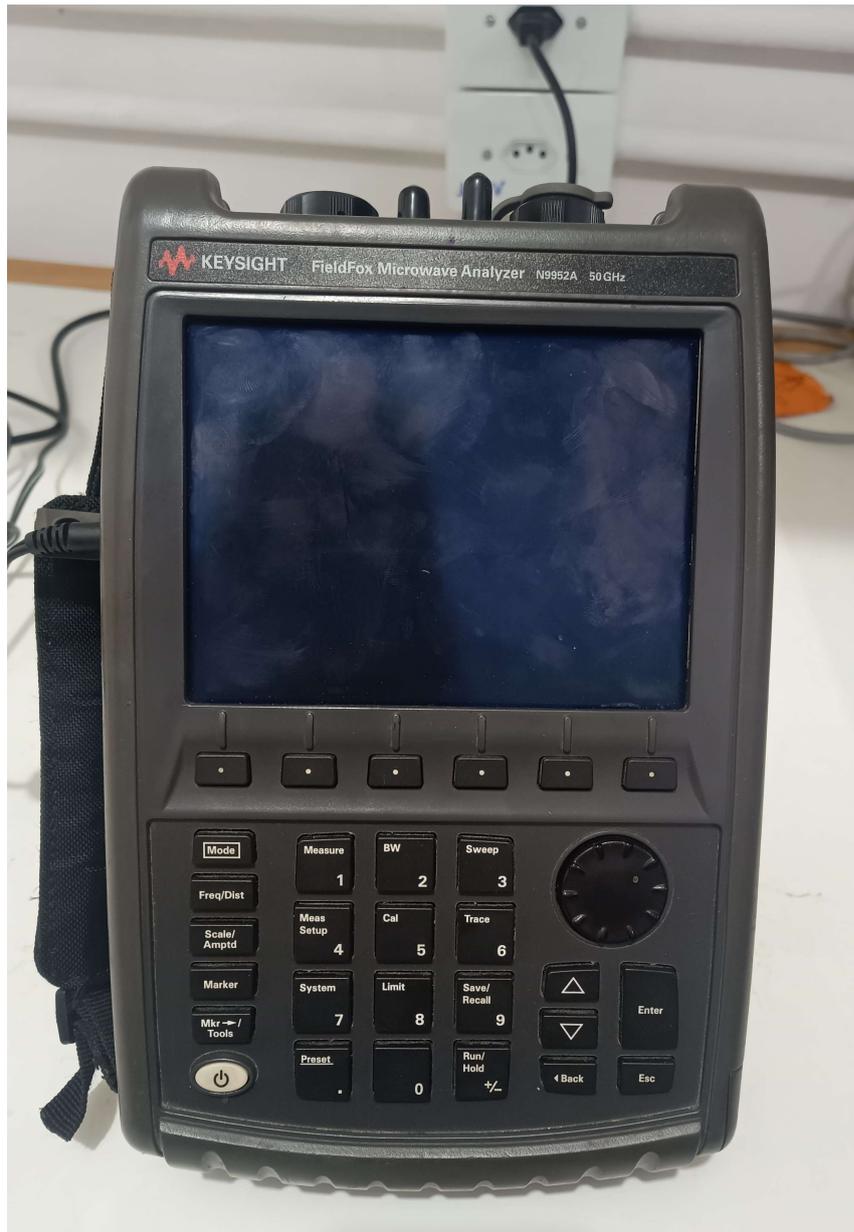
As fotomáscaras necessárias para a fabricação por fotolitografia foram feitas utilizando o negativo do circuito feito em um editor de imagens e impressas em um papel transparente.

4.3 Medição

A medição dos dispositivos produzidos foram feitas utilizando o analisador de redes de microfita apresentado na Figura 4.3. Para a utilização deste equipamento foi necessário realizar a calibração com o uso do kit mostrados nas Figuras 4.4 e 4.5. Para conectar

as estruturas ao analisador foram utilizados cabos coaxiais e conectores, o que pode ser observado na Figura 4.6.

Figura 4.3: Analisador de micro-ondas



Fonte: A autora (2023)

Figura 4.4: kit de calibração utilizado na medição



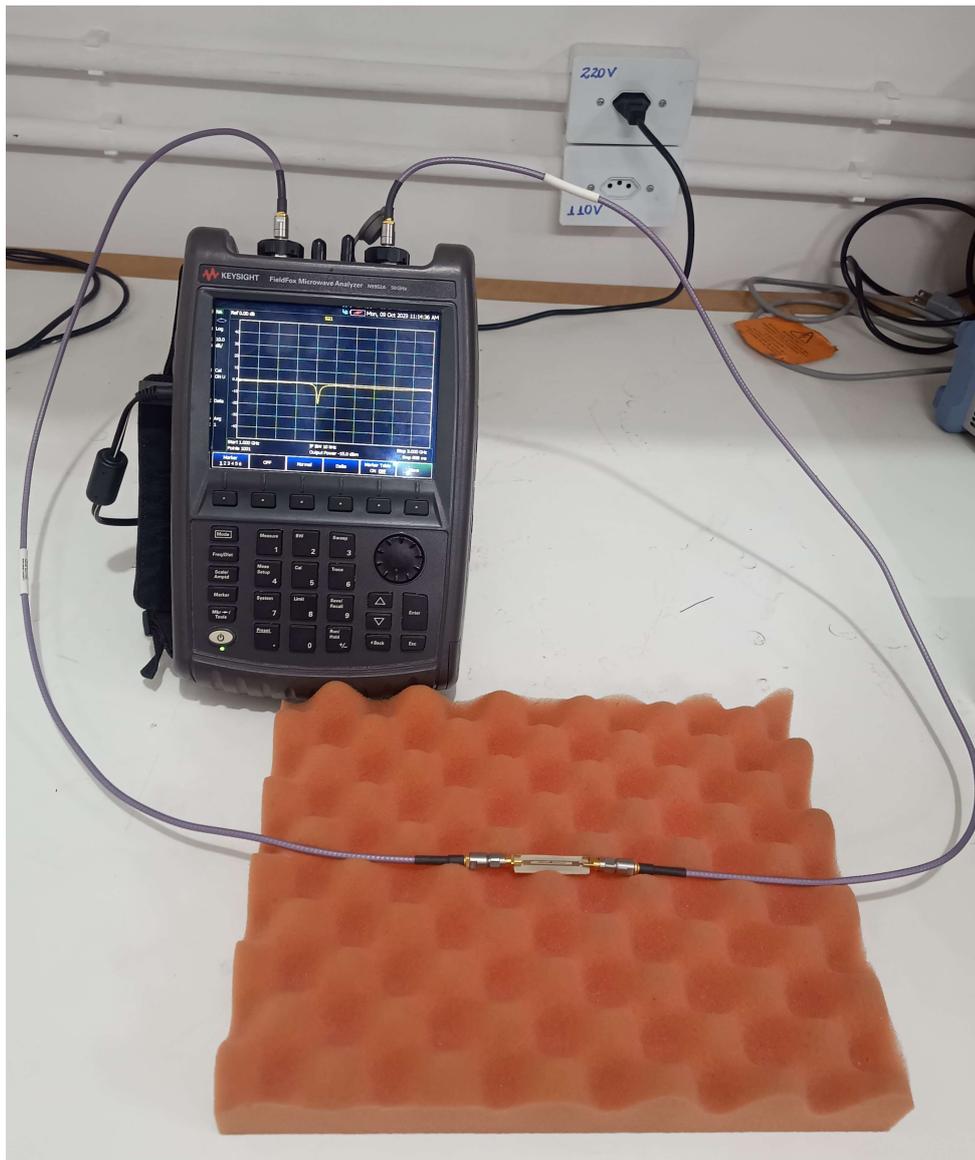
Fonte: A autora (2023)

Figura 4.5: kit de calibração utilizado na medição aberto



Fonte: A autora (2023)

Figura 4.6: Medição da estrutura



Fonte: A autora (2023)

Capítulo 5

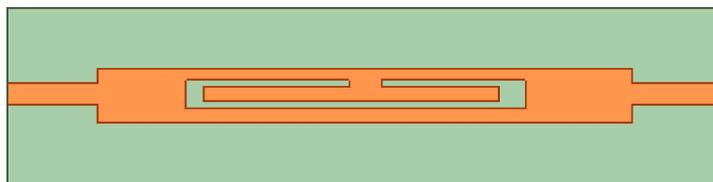
Desenvolvimento

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de cada etapa descrita no capítulo de metodologia.

5.1 Simulação

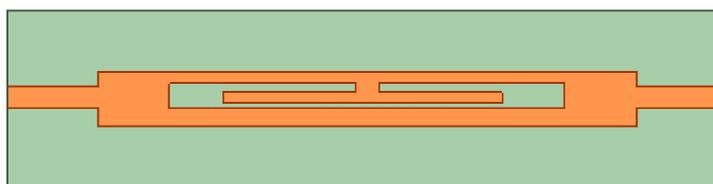
Podem ser observadas nas Figuras 5.1 e 5.2 as estruturas 1 e 2 simuladas no *software*. As Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam os resultados observados nas simulações das estruturas.

Figura 5.1: Simulação da estrutura 1



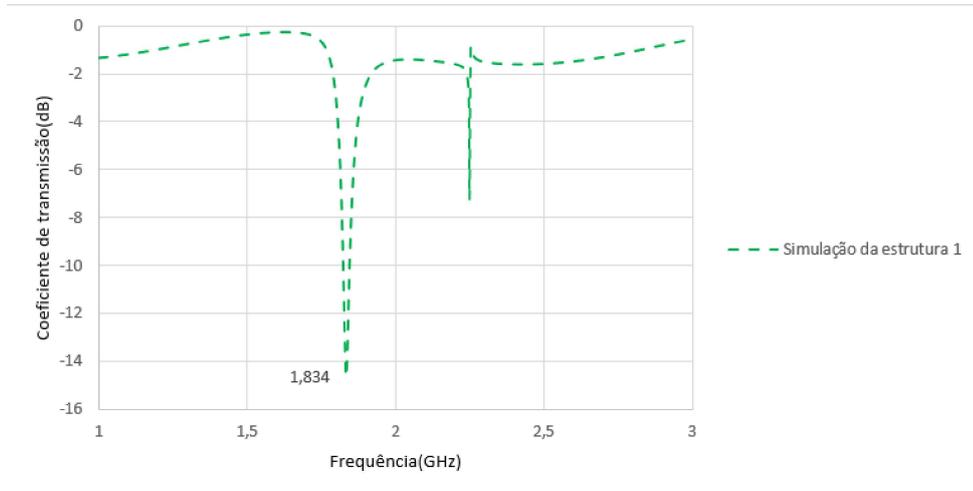
Fonte: A autora (2023)

Figura 5.2: Simulação da estrutura 2



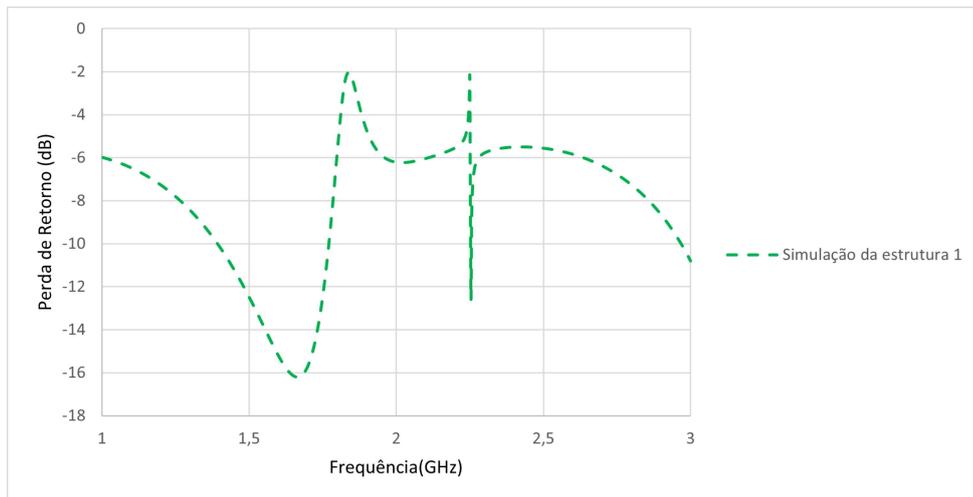
Fonte: A autora (2023)

Figura 5.3: Resultado de coeficiente de transmissão por frequência da simulação da estrutura 1



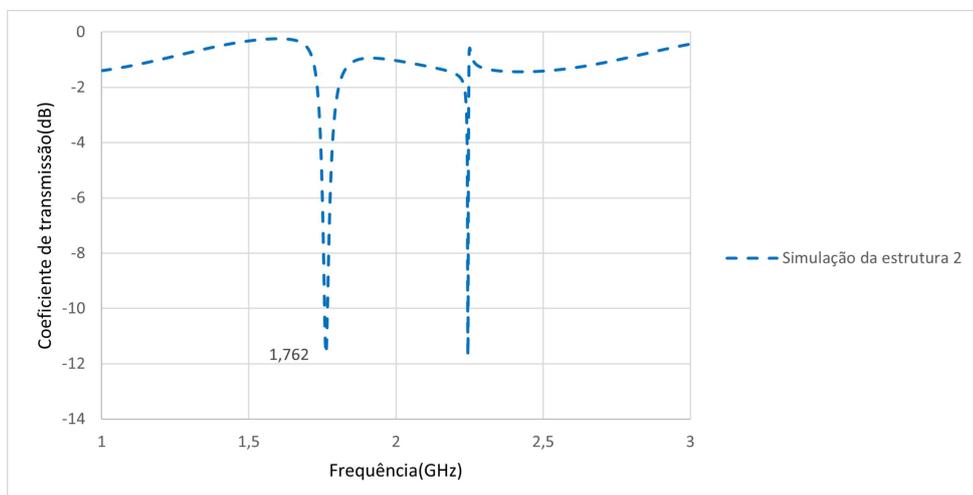
Fonte: A autora (2023)

Figura 5.4: Resultado de perda de retorno por frequência da simulação da estrutura 1



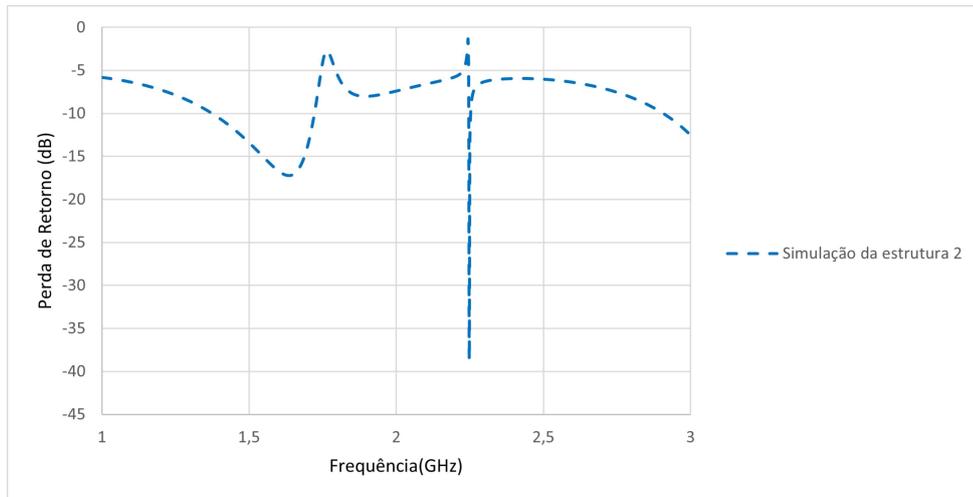
Fonte: A autora (2023)

Figura 5.5: Resultado de coeficiente de transmissão por frequência da simulação da estrutura 2



Fonte: A autora (2023)

Figura 5.6: Resultado de perda de retorno por frequência da simulação da estrutura 2



Fonte: A autora (2023)

5.2 Fabricação

Nas Figuras 5.7 e 5.8 podem ser observados os negativos dos circuitos da estrutura 1 e 2. Nas Figuras 5.9 e 5.10 há os dispositivos produzidos em comparação com uma régua.

Figura 5.7: Fotomáscara usada na fabricação da placa de circuito impresso da estrutura 1



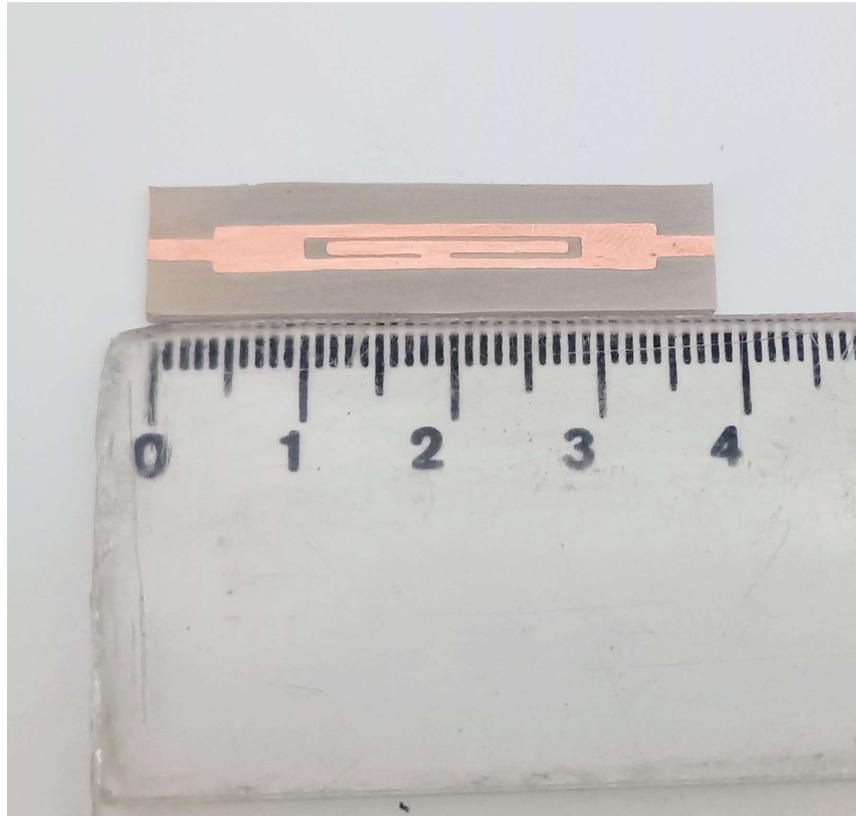
Fonte: A autora (2023)

Figura 5.8: Fotomáscara usada na fabricação da placa de circuito impresso da estrutura 2



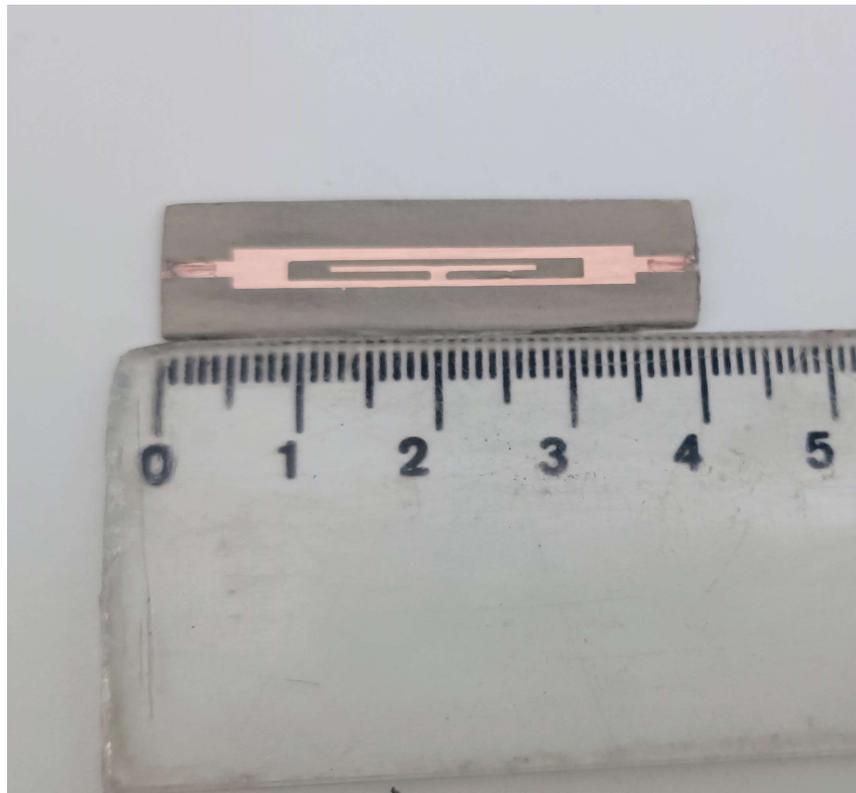
Fonte: A autora (2023)

Figura 5.9: Placa de circuito impresso da estrutura 1



Fonte: A autora (2023)

Figura 5.10: Placa de circuito impresso da estrutura 2

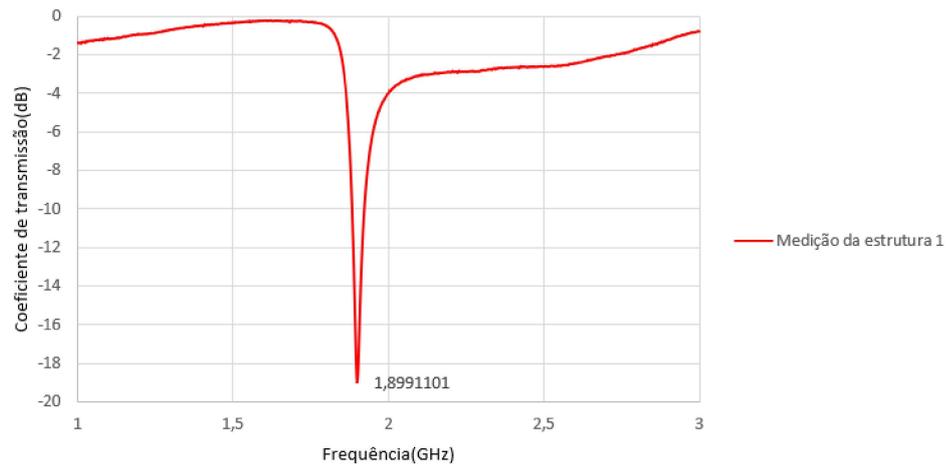


Fonte: A autora (2023)

5.3 Medição

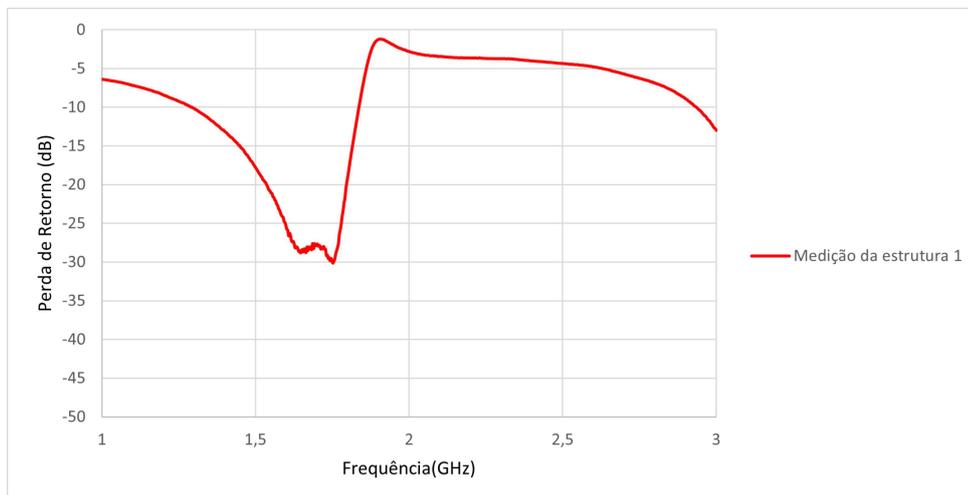
As Figuras 5.11, 5.13, 5.12 e 5.14 apresentam os resultados observados nas medições das estruturas 1 e 2.

Figura 5.11: Resultado de coeficiente de transmissão por frequência da medição da estrutura 1



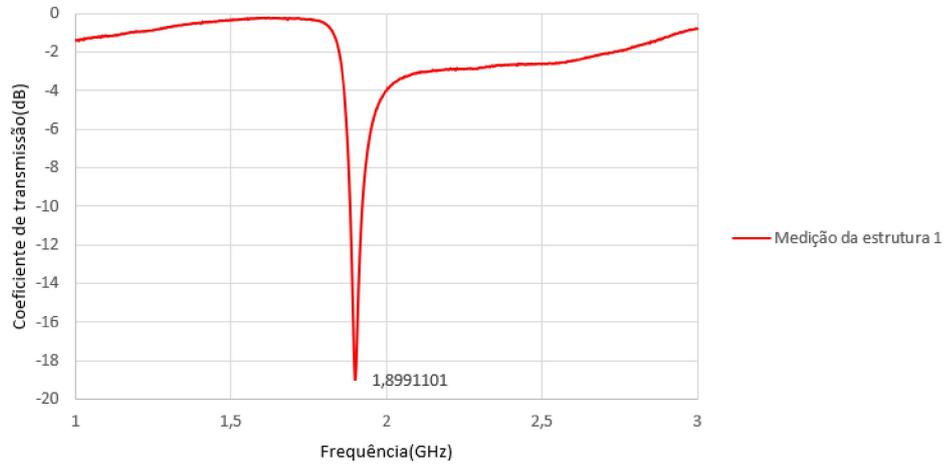
Fonte: A autora (2023)

Figura 5.12: Resultado de perda de retorno por frequência da medição da estrutura 1



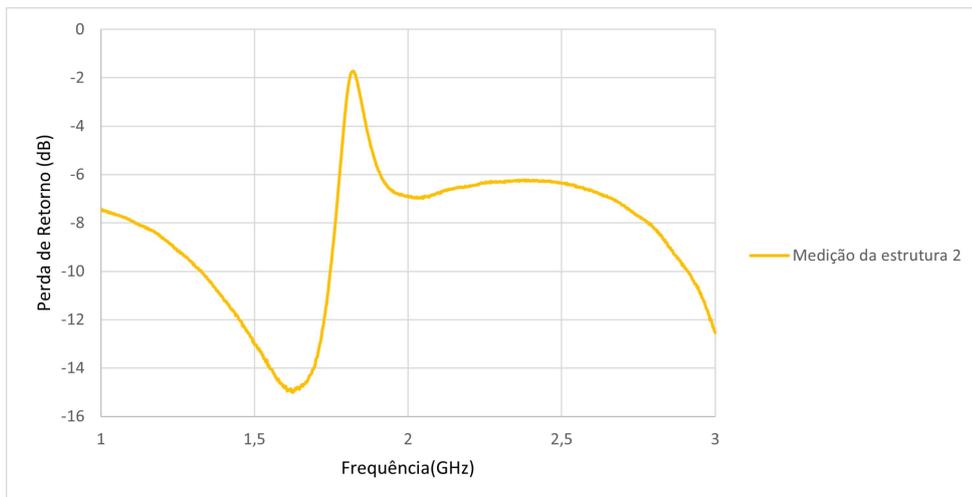
Fonte: A autora (2023)

Figura 5.13: Resultado de coeficiente de transmissão por frequência da medição da estrutura 2



Fonte: A autora (2023)

Figura 5.14: Resultado de perda de retorno por frequência da medição da estrutura 2



Fonte: A autora (2023)

Capítulo 6

Resultados

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos nas simulações e medições das estruturas 1 e 2, aos quais foram projetadas e fabricadas. A partir dos resultados obtidos foram comparados o comportamento das curvas medidas e simuladas das estruturas 1 e 2.

A figura 6.1 apresenta o comportamento em frequência do coeficiente de transmissão dos sinais simulado e medido da estrutura 1. A frequência central da simulação é de 1,834 GHz e a frequência central observada na medição é de 1,899 GHz. Pode ser observado que as curvas simulada e medida do coeficiente de transmissão da estrutura 1 são próximas, com a diferença esperada.

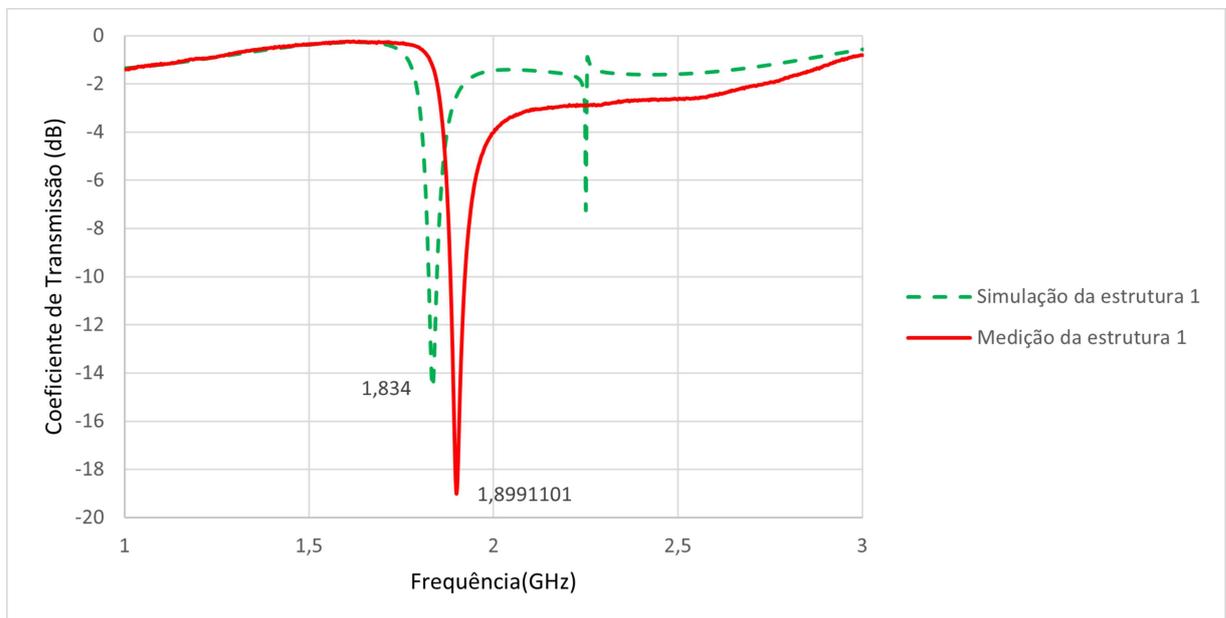
A figura 6.2 apresenta o comportamento em frequência do coeficiente de transmissão dos sinais simulado e medido da estrutura 2. A frequência central da simulação é de 1,762 GHz e a frequência central observado na medição é de 1,818 GHz. Pode ser observado que as curvas simulada e medida do coeficiente de transmissão da estrutura 2 são próximas, com a diferença esperada.

A figura 6.3 apresenta o comportamento em frequência da perda de retorno dos sinais simulado e medido da estrutura 1. Pode ser observado que as curvas simulada e medida do perda de retorno da estrutura 1 são próximas, com uma pequena diferença já esperada.

A figura 6.4 apresenta o comportamento em frequência da perda de retorno dos sinais simulado e medido da estrutura 2. Pode ser observado que as curvas simulada e medida do perda de retorno da estrutura 2 são próximas, com a diferença esperada.

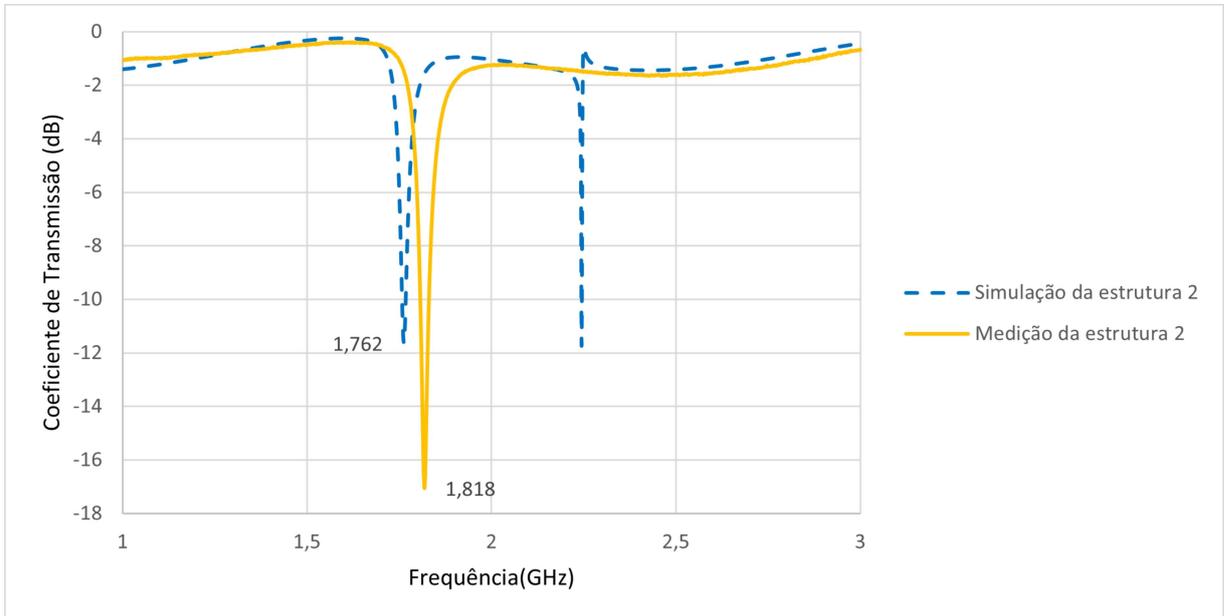
Comparando os resultados de simulação e medição apresentados nas figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, a medição se aproxima da simulação, desta forma a fabricação por fotolitografia apresenta uma precisão satisfatória. Ao comparar os resultados das estruturas 1 e 2, pode-se afirmar que as mudanças nas variáveis de tamanho resultaram em um certo deslocamento na curva do coeficiente de transmissão. Desta forma, podem ser ajustados estas variáveis para que o dispositivo possa trabalhar em outra frequência que seja próxima.

Figura 6.1: Comparação dos dados simulados e medidos de coeficiente de transmissão por frequência da estrutura 1



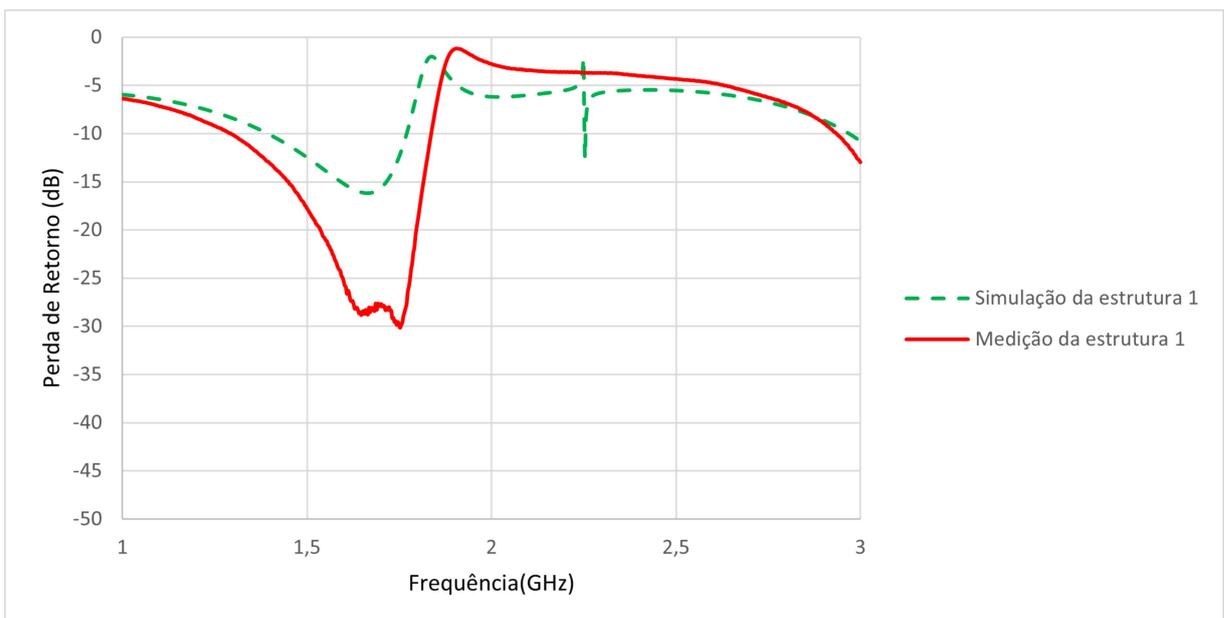
Fonte: A autora (2023)

Figura 6.2: Comparação dos dados simulados e medidos de coeficiente de transmissão por frequência da estrutura 2



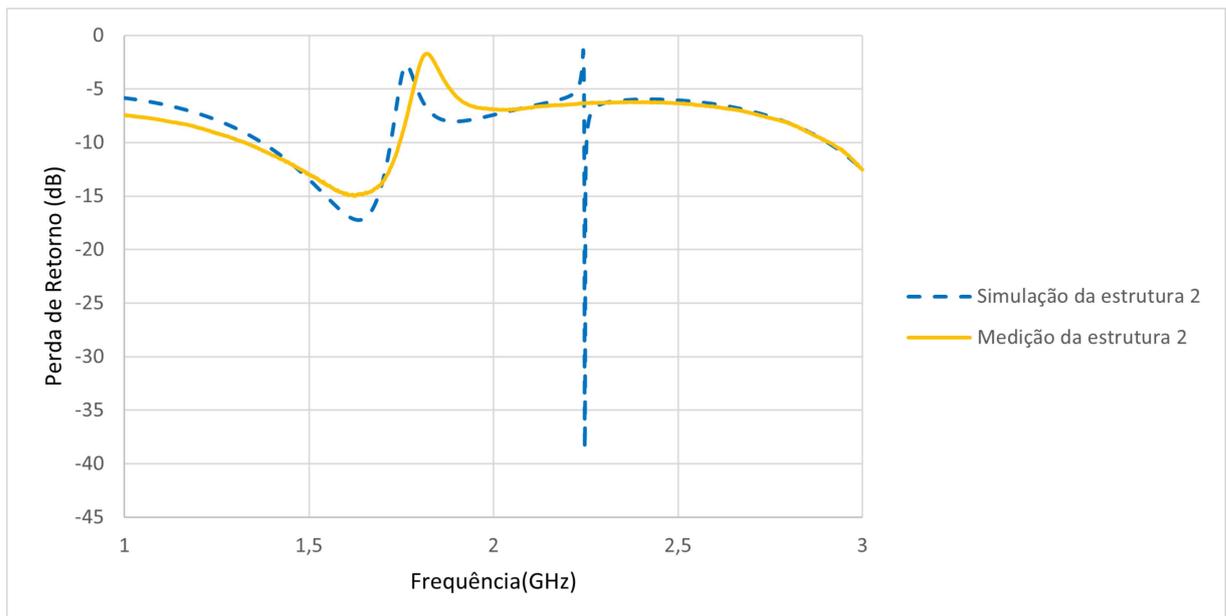
Fonte: A autora (2023)

Figura 6.3: Comparação dos dados simulados e medidos de perda de retorno por frequência da estrutura 1



Fonte: A autora (2023)

Figura 6.4: Comparação dos dados simulados e medidos de perda de retorno por frequência da estrutura 2



Fonte: A autora (2023)

Capítulo 7

Conclusão

Este trabalho apresentou um modelo de estrutura de microfita de um filtro rejeita-faixa micro-ondas com uma estrutura de "T" invertido. A estrutura projetada neste trabalho é baseada em (ZHU et al., 2016) e trabalha na faixa de frequências de 1GHz a 3GHz, faixa útil para diversas aplicações.

No modelo do filtro há algumas variáveis de tamanho, para este trabalho foram estabelecidos valores para 2 estruturas, aos quais foram realizadas algumas simulações.

A simulação ocorreu no *software Ansys HFSS*. Foi utilizada a fotolitografia para a fabricação dos circuitos, cujas etapas deste processo foram descritas no capítulo 3. Com o analisador de micro-ondas, foram feitas as medições.

Os resultados obtidos da medição se aproximou dos resultados da simulação, com diferenças esperadas. Foi notado um deslocamento de curva comparando as resultados das duas estruturas. Desta forma ao modificar as variáveis de tamanho no modelo do filtro se obtêm diferentes deslocamentos em frequência do coeficiente de transmissão.

O objetivo principal deste trabalho foi alcançado ao ser projetado e fabricado o filtro rejeita-faixa de micro-ondas utilizando o *design* com conexão paralela de "T" invertido que funciona no intervalo de 1GHz a 3GHz.

Referências

- ADAM, S. F.; HEWLETT, P. *Microwave theory and applications*. 2. ed. [S.l.]: Hewlett-Packard Company, 1969.
- BEZERRA, A. L. dissertação, *Aplicação de Filtros planares de Micro-ondas com Ressonadores de Malha Aberta e Stubs Internos em Duplexadores*. Recife, PE: [s.n.], 2006.
- HONG, J.-S.; LANCASTER, M. J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001.
- MICROWAVE101. *S-parameters*. Acesso em: 25/09/2023. Disponível em: <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/s-parameters>.
- MINERVINO, D. R. dissertação, *Desenvolvimento de estruturas integradas de filtros e antenas para aplicações em sistemas de comunicação sem fio*. 2013.
- PONTES, L. P. dissertação, *Defasador de microfita baseado na geometria fractal de hilbert*. Recife, PE: [s.n.], 2020.
- PONTES, L. P. et al. Microstrip 3-bit fractal-based phase shifter. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 21, n. 4, p. 598, 2022.
- POZAR, D. M. *Microwave Engineering*. 4. ed. New York: Wiley-Interscience, 2012.
- RAMOS, A. R. dissertação, *Filtros passa-baixa em placas de circuito impresso para microondas*. Florianópolis, SC: [s.n.], 2019.
- SHURE, A. *R-F Transmission Lines*. 1. ed. [S.l.]: John F. Rider Publisher, 1956.
- SILVA, C. P. N. et al. Reconfigurable frequency discriminator based on fractal delay line. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 29, n. 5, p. 186–188, 2019.
- SINTONIA_FINA. *Rejeita-Faixa*. Acesso em: 17/10/2023. Disponível em: <https://sintoniafinadotcom.wordpress.com/indutores/filtros/rejeita-faixa/>.
- WIKIPEDIA. *Filtro rejeita-faixa*. Acesso em: 17/10/2023. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Filtro_rejeita-faixa.

WIKIPEDIA. *Microwave*. Acesso em: 14/09/2023. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave>.

WIKIPEDIA. *Transmission line*. Acesso em: 17/09/2023. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_line.

ZHU, X. et al. Design of micro-strip low pass filter loaded by inverse t-shape parallel branch. *Electronic Components amp; Material*, v. 35, n. 5, p. 22–26, 2016.