



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI  
Departamento de Engenharia Elétrica e Informática - DEE

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
**ANÁLISES PARAMÉTRICAS DE UM FILTRO  
PASSA-FAIXA RSIW EM BANDA S**

MARINA LUA FERREIRA

Campina Grande, PB  
03 de Fevereiro de 2020

MARINA LUA FERREIRA

## **ANÁLISES PARAMÉTRICAS DE UM FILTRO PASSA-FAIXA RSIW EM BANDA S**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharela em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

---

**Professor Dr. Alexandre Jean René  
Serres**  
Orientador

Campina Grande, PB

03 de Fevereiro de 2020

MARINA LUA FERREIRA

# ANÁLISES PARAMÉTRICAS DE UM FILTRO PASSA-FAIXA RSIW EM BANDA S

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharela em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

---

**Professor Dr. Alexandre Jean René  
Serres**  
Orientador

---

**Professor Avaliador**  
Avaliador

Campina Grande, PB  
03 de Fevereiro de 2020

*Dedico este trabalho à minha mãe, Maria de Fátima (in memoriam).  
Você sonhou esse sonho junto comigo desde o princípio.  
Sua menina vai ser engenheira.*

# Agradecimentos

Cursar Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) durante 5 anos e 9 meses foi uma das experiências mais difíceis, desafiadoras e transformadoras que já vivi. Por estar aqui hoje, realizando um dos grandes sonhos da minha vida, gostaria de agradecer primeiramente a Deus, que me deu forças, ainda quando pensei que não as tinha mais, para continuar. Com Ele aprendi que a gente tem mais força do que pensa. E que, lutando com honestidade e amor, recebemos aquilo que está preparado especialmente para nós, mesmo que demore.

Esse sonho foi sonhado desde que me entendo por gente. Mas, nunca foi sonhado sozinho. Jamais estaria aqui hoje sem a minha mãe, que fez tudo que podia (e mais) para garantir minha educação e a realização de todos os meus sonhos, dos mais simples aos mais difíceis. Por isso, agradeço imensamente à minha mãe, Maria de Fátima (*in memoriam*). Mainha, infelizmente a senhora não pôde estar aqui hoje para comemorar comigo. Mas, espero que aonde você estiver, esteja orgulhosa. Isso tudo aqui é seu também. Te amo.

Agradeço também a uma das pessoas mais bondosas e simples que já conheci na minha vida. Meu pai, Renato, à sua própria maneira, garantiu que nada me faltasse durante toda a minha vida. Apesar de não entender essa realidade do ensino superior muito bem, demonstrou preocupação e carinho por mim todos os dias. Fosse ligando para perguntar se eu já comi, esperando acordado até tarde ou comprando um bolo que eu tanto gosto. Painho, espero que o senhor saiba que essa luta nunca foi só minha. Sempre lutei por mim e por você.

Posso garantir, sem nenhuma sombra de dúvidas, que eu jamais teria concluído minha graduação, nem seria metade do ser humano que me tornei, sem o meu irmão. A ele, por existir e por me amar incondicionalmente, agradecerei todos os dias da minha vida. Daniel, saiba que você é um dos meus grandes heróis. Obrigada por me ajudar a ser quem eu sou. Nossos sonhos estão apenas começando. O mundo é imenso. Espero que você esteja orgulhoso por tudo que consegui.

Quero agradecer à minha sobrinha, Júlia, por, ainda sem idade ou maturidade suficiente para entender, ter me dado forças para continuar. Pequena, por inúmeras vezes você foi a minha maior razão de alegria nessa jornada. Tudo isso aqui é para você também. Espero te presentear, mimar e ajudar a te educar com todos os frutos colhidos nessa jornada. Quando você tiver idade suficiente para ler, lembre que te amo infinitamente.

Ao restante da minha família, representados nas pessoas de Josi, Flávia, Elba e minha tia Cici, quero agradecer por terem contribuído diretamente para que eu chegasse até aqui. Seja com orações, carinho ou apoio. Meus grandes agradecimentos e amor.

Gostaria de ressaltar algo que não quero esquecer nunca. Eu jamais teria chegado até aqui sem algumas pessoas. Normalmente eu os chamo de amigos, mas não seria nenhum exagero chamá-los de anjos. É isto que eles vem sendo para mim desde que os conheci. Fui abençoada e privilegiada por conhecer algumas das melhores pessoas que já conheci na minha vida dentro da universidade.

Não apenas agradeço, como também dedico este trabalho e a realização desse sonho, aos meus amigos. Meus parceiros de vida, de lágrimas e de alegria. Das melhores risadas, músicas e comemorações. Agradeço à Mylena, Monaliza, Alex, Ulisses, Samuel Melo, Samuel Medeiros, Camila, Matheus Guerra, Alison, Bruno, Elias, Thalís e Pedro. Vocês foram essenciais para tudo que conquistei. Não tenho dúvidas nem receio ao afirmar que eu não estaria aqui hoje sem vocês. Obrigada por serem fortaleza quando tudo parecia desmoronar ao redor. À vocês, meu amor sincero e um espaço no meu coração que ninguém vai tomar. Que a vida nos leve para todos os lugares no mundo que quisermos (ou precisemos) ir. Nenhuma distância irá mudar as lembranças que construímos. Espero que todo mundo, em algum momento da vida, encontre pessoas como vocês.

Agradeço aos demais amigos que, por todos os motivos e contratempos da vida adulta, não puderam estar fisicamente comigo todos os dias, mas se fizeram presentes em mensagens, orações, energias positivas, preocupação, torcida e muito amor. Em especial a: Maria Tereza, Maria Luiza, Thiago, Raphael V., Raphael Santana, Ariosto, Margareth, Safire, Igor, Izabelly, Vivianne, Gláuber, Jacó, Naínna e João Victor. Vocês contribuíram diretamente, cada um a sua maneira, para que eu estivesse aqui hoje. Meu carinho por vocês é imensurável. Muito obrigada.

Aos demais amigos que, principalmente nessa fase final do curso, dedicaram um imenso carinho, apoio e torcida, gostaria de agradecer por tantos sentimentos lindos. Vocês foram uma linda e inesperada surpresa. Obrigada por todos os abraços, mensagens e celebrações que, nessa fase final, me deram forças quando elas estavam acabando. Sigo torcendo pela felicidade e pelo sucesso de vocês. Em especial, a Matheus Cardoso, Jéssica, Lara, Luiz, Hítalo, Andréa, Rossana, Isys e Weverton.

Agradeço ainda, a três pessoas que me ajudaram na realização desse trabalho. Sem eles, tudo teria sido muito mais difícil. Samuel Medeiros, Camila Rodrigues e Matheus Guerra, espero que vocês saibam que minha admiração por cada um é imensurável. Espero ser um pouquinho de tudo que vocês são.

Agradeço também ao professor Alex Serres, pela orientação e pelos conhecimentos repassados. Por me apoiar nessa fase tão complicada de fim de curso e por se mostrar sempre solícito quando precisei.

Por fim, reforço meus agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para me ajudar a enfrentar essa jornada tão difícil. Essa vitória nunca será apenas minha.

*Words are, in my not-so-humble opinion, our most inexhaustible source of magic.*

**J. K. Rowling**

# Resumo

Com a crescente demanda por sistemas de telecomunicações mais eficientes e com alto nível de otimização, a pesquisa voltada para o desenvolvimento e estudo de circuitos que atendam a esses critérios apresenta cada vez mais potencial. No contexto de altas frequências, mais especificamente na faixa de micro-ondas, uma tecnologia vem se destacando recentemente. A tecnologia SIW (*Substrate Integrated Waveguide*) apresenta vantagens por possuir baixas perdas por irradiação, redução do custo de fabricação e alta capacidade de integração com outros tipos circuitos. Dentre as variações apresentadas por essa tecnologia, no presente trabalho destaca-se a tecnologia RSIW (*Ridge Substrate Integrated Waveguide*). Ambas as tecnologias são aplicadas no desenvolvimento de diversos dispositivos de micro-ondas, dentre eles: antenas e filtros. Na tecnologia RSIW são inseridos tocos (*ridges*) metálicos no interior da estrutura e, como consequência, obtém-se melhorias na largura de banda de operação do filtro. No presente trabalho é apresentado o estudo e otimização de um filtro de micro-ondas utilizando a tecnologia RSIW, operando na banda S (2GHz – 4GHz). Esse filtro será reproduzido e analisado a partir de simulações no software ANSYS® *Electronics Desktop*.

**Palavras-chaves:** micro-ondas; filtro; RSIW; banda S.

# Abstract

With a growing demand for more efficient and highly optimized telecommunications systems, researches about the development and study of circuits that present these specifications have increasingly potential. In the context of high frequencies, more specific in microwave range, a technology has been standing out recently. SIW (Substrate Integrated Wave Guide) technology has advantages such as low irradiation rates, reduced manufacturing cost and high integration capability with other types of circuits. Among the variations of this technology, the present work focuses in the RSIW (Ridge Substrate Integrated Wave Guide) technology. Both technologies are applied in the development of various microwave devices, including antennas and filters. In RSIW technology, metal ridges are inserted into the structure and as a result, improvements in the filter bandwidth are achieved. The present work presents a study and optimization of a microwave filter using RSIW technology, operating in the S band (2GHz - 4GHz). This filter will be reproduced and analyzed with simulations in ANSYS<sup>®</sup> *Electronics Desktop* software.

**Key-words:** microwave; filter; RSIW; S band.

# Lista de Ilustrações

Figura 1 – Modelos de estruturas físicas reais de guias de onda metálicos . . . . .	19
Figura 2 – Representação de um guia de onda retangular metálico oco clássico . . .	20
Figura 3 – Modelo genérico de uma estrutura SIW . . . . .	21
Figura 4 – Primeiro modelo de estrutura RSIW proposto . . . . .	25
Figura 5 – Modelo genérico de uma estrutura RSIW . . . . .	25
Figura 6 – Vista transversal do modelo genérico de estrutura RSIW . . . . .	26
Figura 7 – Circuito equivalente RSIW . . . . .	27
Figura 8 – Visão do <i>ridge</i> para cálculo de C e L na estrutura RSIW . . . . .	28
Figura 9 – Comparação entre as tecnologias de guia de ondas clássico, SIW e RSIW	30
Figura 10 – Filtro passa-faixa com guia de onda retangular clássico . . . . .	31
Figura 11 – Representação equivalente do poste no interior do filtro . . . . .	32
Figura 12 – Representação dos parâmetros S para uma estrutura de filtro . . . . .	33
Figura 13 – Visão 2D do filtro passa-faixa RSIW . . . . .	34
Figura 14 – Visão Transversal do filtro passa-faixa RSIW . . . . .	35
Figura 15 – Circuito equivalente do filtro passa-faixa RSIW . . . . .	36
Figura 16 – Resultados simulados dos coeficientes $S_{11}$ e $S_{21}$ do filtro, com e sem <i>ridge</i>	36
Figura 17 – Distribuição de campo elétrica obtida como resultado da simulação do filtro passa-faixa . . . . .	37
Figura 18 – Visualização 3D da estrutura de FPF SIW sem modificações . . . . .	38
Figura 19 – Visualização superior e lateral da estrutura de FPF SIW sem modificações	39
Figura 20 – Distribuição de campo elétrico no interior do FPF SIW . . . . .	39
Figura 21 – Coeficientes $S_{11}$ e $S_{21}$ para o FPF SIW sem modificações . . . . .	40
Figura 22 – Dimensões modificadas para estudo na estrutura SIW . . . . .	40
Figura 23 – Resultados iniciais do coeficiente $S_{11}$ com variação linear do raio das vias	41
Figura 24 – Resultado do coeficiente $S_{11}$ com variação do raio das vias . . . . .	42
Figura 25 – Resultado do coeficiente $S_{21}$ com variação do raio das vias . . . . .	42
Figura 26 – Resultado do coeficiente $S_{11}$ com variação da distância entre as vias . .	43
Figura 27 – Resultado do coeficiente $S_{21}$ com a variação da distância entre as vias .	43
Figura 28 – Resultado do coeficiente $S_{11}$ com variação do recuo . . . . .	45
Figura 29 – Resultado do coeficiente $S_{21}$ com a variação do recuo . . . . .	45
Figura 30 – Visualização 3D da estrutura de FPF RSIW sem modificações . . . . .	46
Figura 31 – Visualização superior e lateral da estrutura de FPF RSIW . . . . .	46
Figura 32 – Distribuição de campo elétrico no interior do FPF RSIW . . . . .	47
Figura 33 – Coeficientes $S_{11}$ e $S_{21}$ para o FPF RSIW sem modificações . . . . .	48
Figura 34 – Dimensões modificadas para estudo na estrutura RSIW . . . . .	49

Figura 35 – Resultados iniciais do coeficiente $S_{11}$ com variação linear da altura dos tocos metálicos . . . . .	49
Figura 36 – Resultado do coeficiente $S_{11}$ com variação da altura dos tocos metálicos	50
Figura 37 – Resultado do coeficiente $S_{21}$ com variação da altura dos tocos metálicos	50
Figura 38 – Resultado do coeficiente $S_{11}$ com variação da distância entre as fileiras de <i>ridges</i> . . . . .	52
Figura 39 – Resultado do coeficiente $S_{21}$ com variação da distância entre as fileiras de <i>ridges</i> . . . . .	52

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dimensões físicas da estrutura SIW do filtro passa-faixa . . . . .	35
Tabela 2 – Dimensões físicas da fileira de <i>ridge</i> do filtro passa-faixa . . . . .	35

# Lista de abreviaturas e siglas

FPF	<i>Filtro Passa-Faixa</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
LTCC	<i>Low Temperature Co-fired Ceramic</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RSIW	<i>Ridge Substrate Integrated Waveguide</i>
SIC	<i>Substrate Integrated Circuits</i>
SIW	<i>Substrate Integrated Waveguide</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>16</b>
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
<b>1.2</b>	<b>Motivação</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>17</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Guias de Onda</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Tecnologia SIW</b>	<b>21</b>
2.2.1	Definição	21
2.2.2	Projeto de Estrutura SIW	22
2.2.3	Vantagens e Características	23
<b>2.3</b>	<b>Tecnologia RSIW</b>	<b>24</b>
2.3.1	Definição	24
2.3.2	Projeto e Funcionamento de Estrutura RSIW	26
2.3.3	Vantagens e Comparação entre as Tecnologias	29
<b>2.4</b>	<b>Filtros</b>	<b>29</b>
2.4.1	Filtros Passa-Faixa e Aplicações em Telecomunicações	30
2.4.2	Filtros Passa-Faixa com Guias de Onda	31
2.4.3	Respostas de Filtros e Parâmetros-S	32
<b>3</b>	<b>FILTRO PASSA-FAIXA RSIW EM BANDA S</b>	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Modelo Estudado</b>	<b>34</b>
<b>3.2</b>	<b>Resultados Desejados</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Estrutura de FPF SIW</b>	<b>38</b>
4.1.1	Análise de Efeitos de Modificações	40
4.1.1.1	Variação no Raio das Vias Metálicas	41
4.1.1.2	Variação na Distância Entre as Vias Metálicas	43
4.1.1.3	Variação no Recuo das Vias Metálicas em Relação às Laterais da Estrutura	44
<b>4.2</b>	<b>Estrutura de FPF RSIW</b>	<b>46</b>
4.2.1	Análise de Efeitos de Modificações	48
4.2.1.1	Variação na Altura dos Tocos Metálicos	49

4.2.1.2	Varição na Posição das Fileiras de <i>Ridges</i> . . . . .	51
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>55</b>

# 1 Introdução

No atual cenário científico e tecnológico mundial, há uma demanda crescente por sistemas de telecomunicações mais eficientes e cada vez mais otimizados. Nesse contexto, dispositivos que operam em faixas de altas frequências, mais especificamente na faixa de micro-ondas, são foco de pesquisas e estudos visando a otimização de suas características. Um exemplo muito característico dessa demanda são sistemas de comunicações móveis. Por serem ferramentas fundamentais nos processos de conexão e transmissão de informações na sociedade contemporânea, necessitam cada vez mais de agilidade e eficiência em tempo real.

Dentre as características desejáveis de um processo de otimização de dispositivos de alta frequência destaca-se: otimização do consumo de energia; redução das dimensões físicas; simplificação dos processos de fabricação; redução de custos; eficiência operacional e redução de perdas de transmissão; entre outras.

No estudo sobre técnicas e dispositivos de transmissão, a tecnologia SIW (*Substrate Integrated Waveguide*) se apresenta como um tipo de tecnologia utilizada para a transmissão de ondas eletromagnéticas. Como afirma KUMAR, JADHAV e RANADE (2012), essa tecnologia é composta por estruturas planares pertencentes à família de circuitos integrados ao substrato, ou SIC (*Substrate Integrated Circuits*).

Os circuitos do tipo SIC são considerados contribuições relevantes no desenvolvimento de circuitos com aplicações na faixa de micro-ondas (WU; DESLANDES; CASSIVI, 2003). Além disso, a natureza planar das estruturas SIW possibilita a sua fabricação pelo processo PCB (*Printed Circuit Board*) e a sua integração com outras tecnologias planares de transmissão, como por exemplo, a microfita.

O SIW é definido como um guia de ondas periódico, composto de duas fileiras de vias (ou furos) metálicos em um substrato dielétrico que conecta duas placas metálicas paralelas (KUMAR; JADHAV; RANADE, 2012).

Como apresentado por RABAH (2017), a tecnologia SIW combina os princípios da tecnologia PCB com as características fundamentais de um guia de onda clássico. Com isso, são superados alguns problemas apresentados pelas estruturas planares clássicas de guias de ondas, tais como as altas perdas por irradiação.

Dentre as variações das estruturas SIW, apresenta-se as estruturas RSIW (*Ridge Substrate Waveguide*). Esse tipo de estrutura surgiu como uma otimização da tecnologia SIW, especialmente no que diz respeito à redução de perdas de transmissão e otimização da largura de banda de operação (CHE et al., 2010).

Adicionando um ou mais tocos (*ridges*) no guia de ondas retangular, é possível reduzir substancialmente a frequência de corte do modo fundamental, com efeito limitado na frequência de corte do segundo modo. O RSIW proporciona um aprimoramento de aproximadamente 73% na largura de banda, em relação ao SIW (BOZZI; GEORGIADIS; WU, 2011).

## 1.1 Objetivos

O principal objetivo da pesquisa é a implementação de um filtro RSIW (*Ridge Substrate Integrated Waveguide*) na banda S (2 a 4 GHz) utilizando como base modelos clássicos existentes na literatura, porém aplicando técnicas de otimização voltadas para contribuir para o aprimoramento das estruturas.

Esse objetivo será alcançado realizando modificações nos componentes do filtro. Deseja-se analisar o efeito de modificações estruturais do circuito sobre os parâmetros e o funcionamento dos filtros. Logo, serão testados diferentes tipos de substrato e geometria (a nível de simulação) para analisar e discutir os efeitos gerais dessas modificações. .

### 1.1.1 Objetivo Geral

- Implementação e análise paramétrica de um filtro de micro-ondas na banda S utilizando a tecnologia RSIW.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudo das técnicas de SIW e RSIW;
- Implementação de filtros de micro-ondas na banda S utilizando as tecnologias SIW e RSIW (simulações);
- Realização de modificações nas estruturas de modo a estudar o efeito das modificações nos parâmetros e funcionamento dos filtros;
- Análise dos resultados obtidos com as modificações implementadas.

## 1.2 Motivação

A principal motivação para o desenvolvimento desse trabalho foi alta demanda por sistemas de comunicações, mais especificamente, dispositivos de transmissão e recepção, otimizados e com alta eficiência.

Em uma sociedade moderna que realiza trocas de informações em tempo real em todas os âmbitos, precisa-se de dispositivos que atendam essa necessidade da forma mais eficiente possível. Além disso, tratando-se de desenvolvimento científico e tecnológico, há uma grande necessidade por dispositivos de telecomunicações com alta capacidade de integração com diferentes tipos de circuitos e tecnologias.

Estudar o desenvolvimento desses tipos de estrutura, bem como formas de otimizá-las e a utilização de diferentes tipos de materiais para desenvolvê-las permite contribuir cientificamente e tecnicamente na área de pesquisa das tecnologias de guias de ondas integrados ao substrato (SIC) e filtros de micro-ondas.

### 1.3 Metodologia

A metodologia empregada no presente trabalho envolveu a realização de pesquisa e atualização bibliográficas sobre o a teoria de guias de onda e filtros de micro-ondas.

Em seguida, foi feita uma pesquisa e realização de um estudo (por meio da leitura de artigos publicados, teses e trabalhos de pesquisa) acerca de alguns modelos de estruturas RSIW já desenvolvidas na literatura. Assim, foi feita a escolha de um modelo para ser utilizado como modelo-base para implementação e realização das modificações estruturais para análise de resultados.

Nas simulações foi utilizado o *software* de simulações eletromagnéticas ANSYS® *Electronics Desktop*. O *software* foi utilizado para simular a estrutura modelo e realizar ensaios aplicando as modificações na estrutura.

### 1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado de acordo com a seguinte sequência:

**Capítulo 01:** Introdução, com a apresentação do tema e os seus respectivos objetivos, além da motivação e da metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

**Capítulo 02:** Embasamento teórico, apresentando os princípios fundamentais da teoria de guias de onda, estruturas planares e filtros. Além disso, serão apresentadas as definições e os princípios de funcionamento das tecnologias SIW e RSIW.

**Capítulo 03:** Apresentação do modelo de estrutura utilizada como base para os estudos desenvolvidos no presente trabalho. Nesse capítulo também serão apresentados os resultados obtidos para as simulações realizadas do modelo base e o seu princípio de funcionamento.

**Capítulo 04:** Apresentação das modificações realizadas sobre o modelo-base de filtro, além dos resultados obtidos e as discussões a respeito desses resultados.

**Capítulo 05:** Conclusão, apresentando as considerações realizadas após a finalização do projeto proposto e as propostas de trabalhos futuros para dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

## 2 Fundamentação Teórica

Para compreender as análises e estudos realizados no presente trabalho, faz-se essencial embasar teoricamente o campo de estudo. Serão apresentados, primeiramente, os princípios fundamentais da teoria de guias de onda.

Em seguida, serão apresentadas as definições, as características do projeto e os princípios de funcionamento das tecnologias SIW e RSIW. Por fim, será feita uma apresentação objetiva dos fundamentos e características de funcionamento dos filtros, com ênfase nos filtros passa-faixas.

### 2.1 Guias de Onda

Guias de onda são estruturas constituídas de um determinado material ao longo de um eixo  $z$ . Os guias de onda são caracterizados pelas grandezas condutividade elétrica ( $\sigma$ ), permeabilidade elétrica ( $\mu$ ) e permissividade elétrica ( $\varepsilon$ ), e são responsáveis por guiar a energia eletromagnética que se propaga ao longo de seus eixos (LEWIN, 1975).

Como apresentado em (STRATTON, 1961), a energia eletromagnética guiada é utilizada no transporte de informações ponto-a-ponto em um sistema de telecomunicações. A Figura 1 apresenta diferentes formas e modelos de guias de onda metálicos comerciais. Cada modelo tem um comportamento e aplicações específicas.

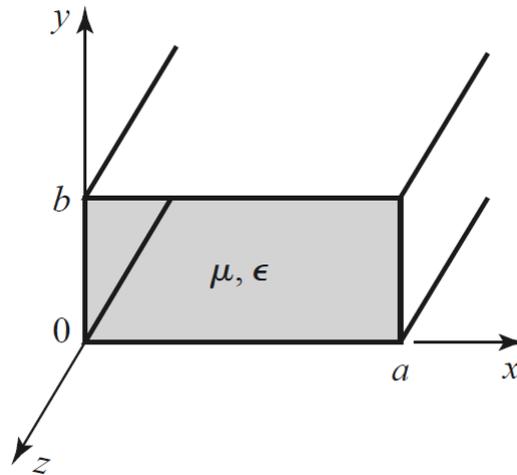
Figura 1 – Modelos de estruturas físicas reais de guias de onda metálicos



Fonte: (Adaptada) Pasternack <<https://www.pasternack.com/>>

Por carregar informações, que podem assumir suas diferentes formas e ter diferentes aplicações, é importante que ocorra o mínimo possível de perdas. Logo, visa-se sempre que a estrutura do guia de onda absorva o mínimo possível da onda guiada. A Figura 2 apresenta a representação de um guia de onda retangular metálico oco clássico.

Figura 2 – Representação de um guia de onda retangular metálico oco clássico



Fonte: (POZAR, 2009)

Devido à tendência de miniaturização e integração, os circuitos de micro-ondas mais modernos são fabricados usando estruturas planares de microfita, em vez de guias de onda metálicos clássicos. O guia de onda retangular metálico oco pode propagar os modos TM e TE, mas não os modos TEM, uma vez que apenas um condutor está presente (POZAR, 2009).

As Equações 2.1, 2.1 e 2.1 apresentam a definição simplificada dos principais modos de propagação. Os modos de propagação de uma onda podem ser definidos como:

- **Modo TE:** Ondas transversais elétricas (campo elétrico perpendicular à direção de propagação);

$$E_z = 0, H_z \neq 0 \quad (2.1)$$

- **Modo TM:** Ondas transversais magnéticas (campo magnético perpendicular à direção de propagação);

$$E_z \neq 0, H_z = 0 \quad (2.2)$$

- **Modo TEM:** Ondas transversais eletromagnéticas (ambos os campos são perpendiculares à direção de propagação);

$$E_z \neq 0, H_z \neq 0 \quad (2.3)$$

## 2.2 Tecnologia SIW

Ao tratar da transmissão de ondas eletromagnéticas, existe na literatura diferentes tecnologias construídas e utilizadas para essa finalidade. A mais tradicional, por meio linhas de transmissão, possui uma natureza não-planar e é composta, basicamente, por cabos (normalmente coaxiais). Esse tipo de transmissão normalmente resulta em perdas por irradiação e perdas dielétricas (KUMAR; JADHAV; RANADE, 2012).

No âmbito de integração com circuitos planares, as linhas de transmissão tradicionais também não se apresentam como as melhores opções devido ao alto nível de complexidade desse processo de integração. Guias de onda tradicionais metálicos seriam uma opção mais indicada para essa finalidade, porém, possuem a desvantagem de serem volumosos e não terem natureza planar (KUMAR; JADHAV; RANADE, 2012).

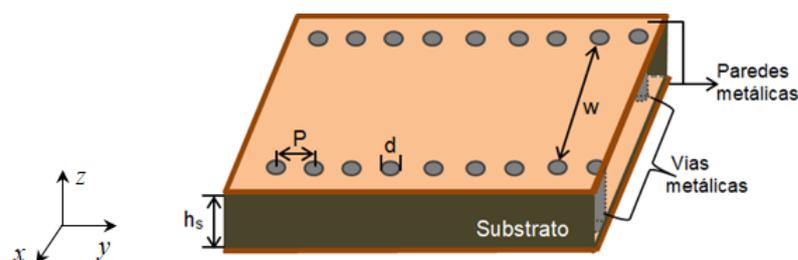
A tecnologia SIW (*Substrate Integrated Waveguide*) é um tipo de tecnologia utilizada para a transmissão de ondas eletromagnéticas. Como afirma KUMAR, JADHAV e RANADE (2012), são estruturas planares pertencentes à família SIC (*Substrate Integrated Circuits*), os circuitos integrados ao substrato. A sua natureza planar possibilita a sua fabricação pelo processo PCB (*Printed Circuit Board*) e a sua integração com outras tecnologias planares de transmissão, a exemplo da microfitas.

As pesquisas a respeito da tecnologia SIW se iniciaram em 1994, quando uma equipe de pesquisas japonesa introduziu o conceito de guias de onda planares. Essa equipe propôs um projeto de guia de ondas com duas fileiras de orifícios metalizados passando por um substrato dielétrico e conectando dois planos metálicos paralelos (RABAH, 2017).

### 2.2.1 Definição

O SIW é um guia de ondas periódico, composto de duas fileiras de vias (ou furos) metálicos em um substrato dielétrico que conecta duas placas metálicas paralelas (DESLANDES; WU, 2006). A Figura 3 apresenta o *design* básico desse tipo de tecnologia.

Figura 3 – Modelo genérico de uma estrutura SIW



Fonte: (SANTOS, 2019)

A tecnologia SIW, basicamente, reproduz o funcionamento de um guia de ondas metálico tradicional preenchido com um dielétrico mas, utilizando a tecnologia de uma placa de circuito impresso planar.

### 2.2.2 Projeto de Estrutura SIW

Para realizar o projeto da estrutura SIW é necessário conhecer, inicialmente os parâmetros básicos desse tipo de estrutura. Os parâmetros são:

- **Largura do SIW** -  $w$
- **Comprimento da cavidade** -  $l$
- **Diâmetro das vias** -  $d$
- **Espessura do substrato** -  $h_s$
- **Espessura do metal** -  $h_l$
- **Distância entre as vias** -  $p$

As Expressões que são utilizadas para dimensionar a estrutura SIW utilizam os seguintes parâmetros: constante da velocidade da luz no espaço livre ( $c$ ) e da frequência angular ( $\omega$ ). Seus valores são apresentados nas Expressões 2.4 e 2.5.

$$c = 2,99 \times 10^8 [m/s] \quad (2.4)$$

$$\omega = 2\pi f [rad/s] \quad (2.5)$$

Para calcular as dimensões físicas do projeto de uma estrutura SIW desejada é possível usar a frequência de ressonância correspondente ao modo fundamental que se pretende propagar no interior dessa estrutura,  $f_{10}$ . Essa frequência é dada pela Expressão 2.6, fornecida por NWAJANA, DAINKEH e YEO (2017).

$$f_{10} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{w_{ef}}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l_{ef}}\right)^2} \quad (2.6)$$

No cálculo da largura e do comprimento da estrutura utilizam-se, respectivamente, as Expressões 2.7 e 2.8. Essas Expressões utilizam os parâmetros da estrutura SIW, apresentados anteriormente. Ambas as Equações estão localizadas em DENG, XU e YANG (2016).

$$w_{ef} = w - 1,08 \left( \frac{d^2}{p} \right) + 0,1 \left( \frac{d^2}{w} \right) \quad (2.7)$$

$$l_{ef} = l - 1,08 \left( \frac{d^2}{p} \right) + 0,1 \left( \frac{d^2}{l} \right) \quad (2.8)$$

A inserção das vias metálicas nas laterais da estrutura SIW tem como objetivo alcançar o efeito de paredes metálicas verticais, visando se aproximar ao comportamento de um guia de onda retangular metálico tradicional. Isso é feito para reduzir perdas por irradiação.(ALHZZOURY, 2013)

Ainda conforme ALHZZOURY (2013) para conseguir alcançar esse comportamento é necessário dimensionar corretamente o diâmetro das vias ( $d$ ) e a distância entre as vias ( $p$ ).

O diâmetro das vias ( $d$ ) está relacionado ao comprimento de onda guiado ( $\lambda_g$ ) e a distância entre as vias ( $p$ ). É importante ressaltar que a distância entre as vias diz respeito a distância entre os centros de duas via adjacentes. As Expressões para o cálculo de  $\lambda_g$ ,  $d$  e  $p$  são dadas pelas Expressões 2.9, 2.10 e 2.11, respectivamente. Essas Equações também são descritas no trabalho de DENG, XU e YANG (2016).

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_r \omega^2}{c^2}\right) - \left(\frac{\pi}{w_{ef}}\right)^2}} \quad (2.9)$$

$$d < \frac{\lambda_g}{5} \quad (2.10)$$

$$p \leq 2d \quad (2.11)$$

A alteração nos parâmetros da estrutura gera efeitos diretos de aumento ou redução de perdas. Ao aumentar o diâmetro das vias será notado um aumento nas perdas no condutor, ao mesmo tempo em que ocorrerá a diminuição das perdas no dielétrico, pois este terá seu volume reduzido com o aumento das vias metálicas. (DENG; XU; YANG, 2016).

### 2.2.3 Vantagens e Características

O principal atrativo dessa tecnologia está no fato de que ela une as principais vantagens das estruturas planares e dos guias de onda tradicionais (BOZZI; GEORGIADIS; WU, 2011). Em aplicações comerciais, as estruturas planares são preferíveis por possibilitarem redução de custos e oferecerem um *design* compacto. Dessa forma, a tecnologia SIW é atraente por combinar os melhores recursos do guia de onda e das tecnologias planares

(MOSCATO et al., 2015). Além dessa, é possível citar outras vantagens da utilização da tecnologia SIW em relação às estruturas tradicionais de guias de onda.

Conforme apresentado por BOZZI, GEORGIADIS e WU (2011) uma vantagem da tecnologia SIW está no fato de que ela é desenvolvida de forma planar, o que lhe torna compatível com técnicas de processamento e fabricação planar já conhecidas, a exemplo das tecnologias PCB ou LTCC.

Ainda segundo BOZZI, GEORGIADIS e WU (2011), as estruturas SIW possuem características de propagação semelhantes às dos guias de onda retangulares clássicos, com destaque para o padrão de linhas de campo e as características de dispersão. Isso torna mais fácil a análise e manipulação desse tipo de tecnologia. Além disso, as estruturas SIW conservam vantagens já reconhecidas dos guias de onda convencionais, como o alto fator de qualidade.

Uma das principais vantagens da tecnologia SIW está em sua capacidade de integração. É possível integrar diferentes componentes no mesmo substrato, incluindo componentes passivos, elementos ativos e até antenas (BOZZI; GEORGIADIS; WU, 2011). Graças a possibilidade de montagem de um ou mais conjuntos de circuitos no mesmo substrato fornecida por essa tecnologia, não é necessário realizar transições entre elementos fabricados com diferentes tecnologias. Essa característica proporciona a redução de perdas e parasitas na estrutura (BOZZI; GEORGIADIS; WU, 2011).

No geral, é possível caracterizar as estruturas SIW como compactas, leves, econômicas e fáceis de fabricar (KUMAR; JADHAV; RANADE, 2012).

## 2.3 Tecnologia RSIW

A tecnologia RSIW (*Ridge Substrate Waveguide*) é uma variação da tecnologia SIW. Esse tipo de tecnologia é utilizado para melhorar a largura de banda da estrutura, em relação às estruturas SIW (MOSCATO et al., 2015).

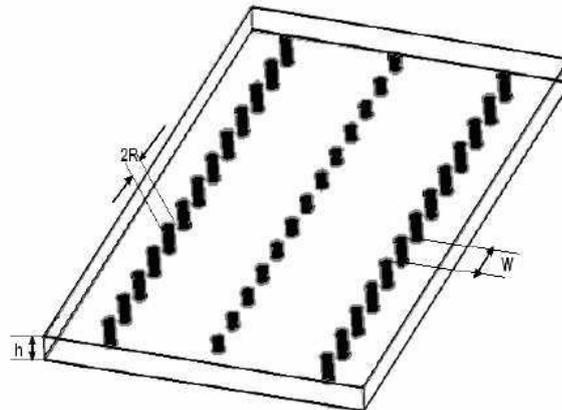
Nessa tecnologia, os princípios de preservação das características fundamentais dos guias de ondas metálicos tradicionais são mantidos. Porém, deseja-se reduzir ainda mais as perdas, principalmente por irradiação, e melhorar a largura de banda da estrutura, especialmente para filtros passa-faixa.

### 2.3.1 Definição

A primeira proposta de implementação de estrutura RSIW foi feita por CHE et al. (2008b). Nessa estrutura a tecnologia de *ridge* foi implementada por meio de uma fila de tocos (ou *ridges*) no centro da estrutura SIW, acompanhando o seu comprimento. Esses tocos possuem uma altura média que não atravessa a placa metálica superior, ou seja, os

tocos metálicos ficam localizados no substrato dielétrico da estrutura atravessando apenas o plano de terra. Essa estrutura apresentou uma melhora de 37% na largura de banda (BOZZI; WINKLER; WU, 2010). A Figura 4 apresenta o modelo de estrutura RSIW proposto por CHE et al. (2008b).

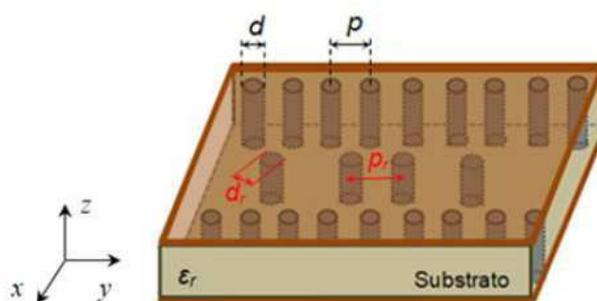
Figura 4 – Primeiro modelo de estrutura RSIW proposto



Fonte: (CHE et al., 2008b)

Assim, é possível definir o RSIW, basicamente, como uma estrutura SIW com uma série de tocos metálicos distribuídos de forma periódica no centro da cavidade. Os tocos não cruzam a placa metálica superior, tendo contato apenas com o substrato e o plano de terra. A Figura 5 ilustra a vista tridimensional de um modelo genérico de estrutura RSIW.

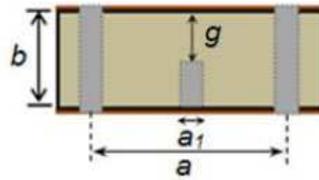
Figura 5 – Modelo genérico de uma estrutura RSIW



Fonte: (SANTOS, 2019)

Já a Figura 6 apresenta uma vista lateral da estrutura, com maior detalhe do posicionamento e tamanho do toco metálico.

Figura 6 – Vista transversal do modelo genérico de estrutura RSIW



Fonte: (SANTOS, 2019)

### 2.3.2 Projeto e Funcionamento de Estrutura RSIW

Para realizar o projeto de uma estrutura RSIW, assim como visto na estrutura SIW, faz-se necessário conhecer os parâmetros básicos desse tipo de estrutura. Os principais parâmetros para uma estrutura RSIW são:

- Largura do RSIW -  $a$
- Altura do substrato -  $b$
- Diâmetro das vias -  $d$
- Distância entre as vias -  $p$
- Diâmetro dos tocos ou *ridges* -  $d_r$
- Distância entre os tocos ou *ridges* -  $p_r$
- Largura do *ridge* -  $a_1$
- Altura dos tocos ou *ridges* -  $b - b_1$
- Distância entre o toco e a placa metálica superior (*gap*) -  $g$

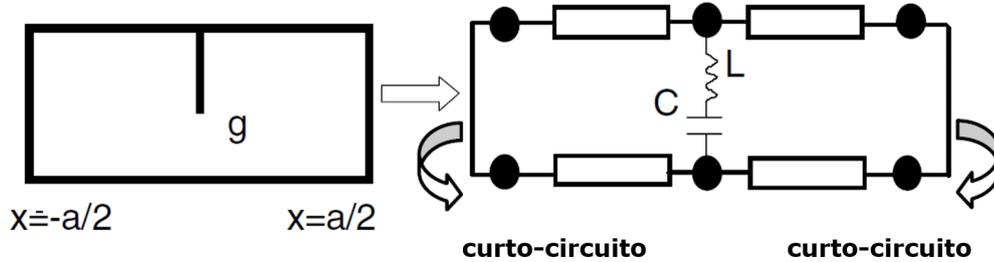
CHE et al. (2008b) apresenta a estrutura RSIW como uma estrutura com postes metálicos periódicos nas laterais, formando as paredes do guia de onda (semelhante à estrutura do SIW) e, além disso, uma série de postes metálicos na parte central da estrutura. Esses postes centrais (*ridges*) possuem uma extremidade em circuito aberto, formando um orifício de passagem (*gap*).

Esse tipo de estrutura foi desenvolvida com o objetivo de melhorar a largura de banda da tecnologia SIW. CHE et al. (2010) apresenta em seu trabalho a investigação de que, utilizando a tecnologia RSIW, a largura de banda é melhorada em até 37%, com possibilidade de otimização e melhorias ainda mais significativas.

A Figura 7 ilustra uma visão do posicionamento do *ridge* na estrutura RSIW, do orifício de passagem, formado e, em seguida, o circuito elétrico equivalente formado. O

circuito equivalente representa uma linha de transmissão 2D, com um capacitância (C) e indutância (L) ligadas em série, derivando do ponto médio do circuito (CHE et al., 2008b).

Figura 7 – Circuito equivalente RSIW



Fonte: (Adaptada) (CHE et al., 2008b)

A capacitância (C) é gerada pela presença do *gap*. A indutância (L) vem do poste metálico (*ridge*) inserido dentro do guia de ondas (CHENG, 1989).

Ainda segundo CHE et al. (2008b), ao analisar a Carta de Smith correspondente ao circuito da linha de transmissão obtido (circuito equivalente) investiga-se que, se um ponto ao longo da linha da cavidade for considerado como um nó na teoria dos circuitos, a soma das admitâncias para os nós será sempre zero (0). Dada essa condição da soma de admitâncias ser sempre zero no ponto de derivação do circuito, é possível formular a condição representada na Expressão 2.12.

$$\frac{1}{\frac{1}{j\omega C} + j\omega L} - 2Y_0 \cot(\beta_x a/2) = 0 \quad (2.12)$$

Para o modo de propagação dominante  $TE_{10}$  tem-se que  $\beta_x a \approx \pi/2$ . Com isso, tem-se que  $1/\omega C > \omega L$ . Logo, a admitância característica ( $Y_0$ ) da linha de transmissão equivalente é obtida conforme apresentado na Expressão 2.13. As Expressões 2.12 e 2.13 podem ser encontradas em CHE et al. (2008b).

$$Y_0 = \frac{\sin \theta}{h} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} = \frac{\pi}{a' \omega \mu h} \quad (2.13)$$

Na Expressão 2.13 a variável  $a'$  representa a largura da estrutura RSIW. O cálculo dessa largura é feito a partir dos parâmetros do guia de ondas retangular equivalente. A Expressão 2.14 apresenta a fórmula utilizada para esse cálculo e foi proposta por CHE et al. (2008a).

$$a' = \frac{2}{\beta_x} \cot^{-1} \left( \frac{\beta_x p}{4} \ln \frac{p}{4r} \right) \quad (2.14)$$

Para a Expressão 2.14 foram considerados  $\beta_x a = \pi/a$  e  $p \leq \lambda_0/20$ . Na Expressão,  $r$  é o raio do poste cilíndrico metálico.

O ponto de corte na propagação ocorre quando a constante de propagação  $\beta_x$  é zero (0). Nessa situação, a onda "salta" para frente e para trás entre as paredes laterais do guia de ondas, não ocorrendo propagação longitudinal ao longo do guia (CHE et al., 2008b). Dessa forma, é possível calcular a frequência de corte no modo de propagação dominante ( $TE_{10}$ ) com a Expressão 2.15.

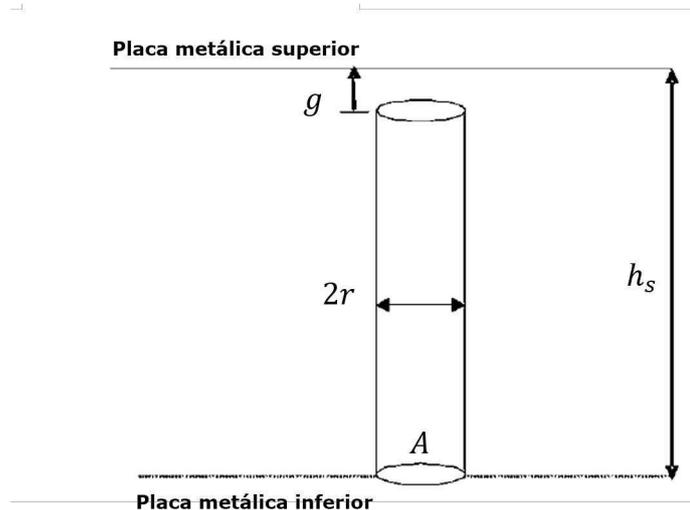
$$\omega_c \sqrt{\mu \varepsilon} = \frac{2}{a'} \cot^{-1} \left( \frac{1}{2Y_0} \frac{\omega_c C}{1 - \omega_c^2 LC} \right) \quad (2.15)$$

Para a Expressão 2.15 foram considerados  $\theta = \pi/2$  e  $Y_0 = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}$ .

Para calcular a capacitância (C) e a indutância (L) do circuito equivalente da estrutura RSIW, é utilizada a visualização do *ridge* apresentada na Figura 8, proposta por CHE et al. (2010). Essa foi a primeira abordagem feita para o cálculo dessas grandezas.

É possível concluir, a partir do trabalho de CHE et al. (2010), que, se o *gap* encontra-se entre o toco metálico e a placa metálica inferior, diferentemente do que vinha sendo discutido até aqui, o efeito causado na estrutura é o mesmo e por isso as grandezas podem ser calculadas da mesma forma.

Figura 8 – Visão do *ridge* para cálculo de C e L na estrutura RSIW



Fonte: (Adaptada) (CHE et al., 2010)

Sabendo que  $A$  é a área  $A = 2\pi r^2$  e sendo  $r$  o raio do cilindro do toco metálico, as Expressões 2.16 e 2.17 são usadas para calcular a capacitância e a indutância do circuito equivalente da estrutura RSIW. Ambas as Expressões foram baseadas nas Expressões propostas por (CHE et al., 2010) e adaptadas por CHOW e TANG (2000) e WHINNERY e JAMIESON (1944), respectivamente.

$$C = \left[ \left( \frac{\varepsilon A}{g} - \frac{\varepsilon A}{h_s} \right)^\delta + \left( \frac{2\pi\varepsilon(h_s - g)}{\ln[2(h_s - g)/r] + K} \right)^\delta \right]^{1/\delta} \quad (2.16)$$

$$L = \frac{\mu_0(h_s - g)}{4\pi} \left[ \ln \left( \frac{h_s - g}{r} \right) + K \right] \quad (2.17)$$

Em que  $\delta$ , na Expressão 2.16 representa a potência arbitrária para compensar o fluxo do campo no *gap* acima de cada poste (CHE et al., 2010). Já a constante K representa a contabilização dos acoplamentos mútuos quase estáticos entre os postes adjacentes (CHOW; TANG, 2000). A Expressão matemática utilizada para calcular  $\delta$  encontra-se apresentada na Expressão 2.18.

$$\delta = 1,39 + ((h_s/g) - 0,83) \left( 0,44 + 0,46e^{-(A/0,3h_s)} \right) \quad (2.18)$$

### 2.3.3 Vantagens e Comparação entre as Tecnologias

A tecnologia RSIW, sendo uma variação da tecnologia SIW, agrega as vantagens já apresentadas pela tecnologia SIW com aquelas fornecidas pelas suas novas características. Com a tecnologia RSIW foi possível obter um maior controle da largura de banda, apresentando melhoras de até 37% nesse parâmetro com relação as mesmas estruturas com SIW (BOZZI; GEORGIADIS; WU, 2011).

Além disso, esse tipo de estrutura apresenta menores perdas por irradiação e menos perdas de transmissão. A Figura 9 apresenta um quadro comparativo entre as tecnologias e estruturas de: guia de ondas clássico; SIW e RSIW. Essa comparação pode ser feita com base na literatura e na revisão bibliográfica acerca desses tipos de tecnologia e suas evoluções. O quadro comparativo foi desenvolvido inspirado no apresentado por PARMENT (2016) em seu trabalho. As cores dos filtros representam o grau de satisfatoriedade em relação à característica analisada. Sendo: verde - satisfatório; amarelo - razoavelmente satisfatório; vermelho - pouco satisfatório.

## 2.4 Filtros

POZAR (2009) define um filtro como uma rede de duas portas usada para controlar a resposta de frequência em um determinado ponto em um sistema de RF ou micro-ondas. O filtro fornece uma transmissão em frequência dentro da sua banda de passagem e realiza uma atenuação na sua banda de rejeição. As respostas em frequência clássicas são: passa-baixa; passa-alta; passa-faixa; e rejeita-faixa. Os filtros possuem aplicações em praticamente qualquer tipo de sistema de comunicações, seja por radar ou por RF.

Figura 9 – Comparação entre as tecnologias de guia de ondas clássico, SIW e RSIW

Tecnologia	Perdas por irradiação	Capacidade de integração	Estrutura compacta	Controle de largura de banda	Facilidade de fabricação
Guia de ondas clássico					
SIW					
RSIW					

Fonte: Própria, 2019.

Para estudar os filtros de micro-ondas, faz-se e importante estudar a teoria e o *design* dos filtros com características de frequência de estruturas periódicas (POZAR, 2009). Exemplos dessas estruturas são as linha de transmissão ou guias de ondas periodicamente carregado com elementos reativos (como é o caso das estruturas SIW e RSIW).

#### 2.4.1 Filtros Passa-Faixa e Aplicações em Telecomunicações

Um filtro passa-faixa é definido como um componente que permite a passagem de frequências dentro de uma certa extensão (largura de banda) e rejeita (atenua) as frequências fora desse alcance selecionado.

Apesar de comumente serem encontrados em aplicações de eletrônica e microeletrônica, os filtros passa-faixa também possuem aplicações na área de telecomunicações. Um exemplo clássico é são os filtros passa-faixa, componentes essenciais dos sistemas de telecomunicações *wireless*, que são utilizados em transmissores e receptores.

Segundo (ELFADL et al., 2012) filtros passa-faixa são utilizados em sistemas de comunicações para: selecionar o sinal utilizável; filtrar componentes harmônicas geradas por elementos não-lineares (amplificadores, osciladores, misturadores) do sistema; resolver problemas de congestionamento espectral e proximidade das bandas alocadas.

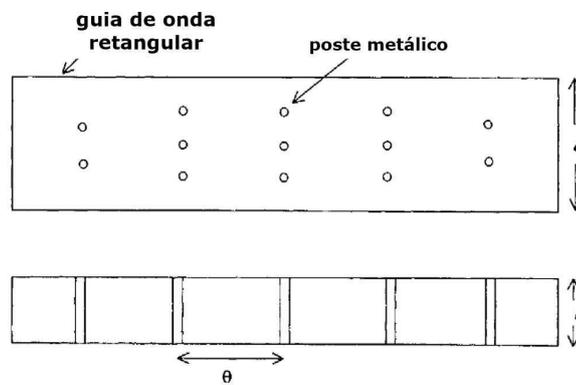
Conforme as demandas acerca do desempenho desse tipo de filtro crescem, como é o caso das demandas por nível de seletividade aumentada e menores restrições de perda de inserção (ELFADL et al., 2012), as tecnologias utilizadas nos filtros precisam conseguir atender a essas solicitações preservando características desejáveis como baixas perdas, custo de fabricação reduzido e facilidade de integração com outros componentes (SANTOS, 2019).

## 2.4.2 Filtros Passa-Faixa com Guias de Onda

Filtros passa-faixa com guias de onda podem ser construídos utilizando comprimentos uniformes do guia de onda carregados com descontinuidades de derivação (HUNTER, 2001). A Figura 10 apresenta um exemplo de filtro implementado com um guia de ondas retangular com postes metálicos conectando as paredes do guia.

Segundo HUNTER (2001) o funcionamento do filtro se dá da seguinte maneira: o princípio de operação do filtro está no fato de que os postes atuam como descontinuidades indutivas de derivação e as secções do guia de ondas entre os postes são ressonadores de meia onda.

Figura 10 – Filtro passa-faixa com guia de onda retangular clássico

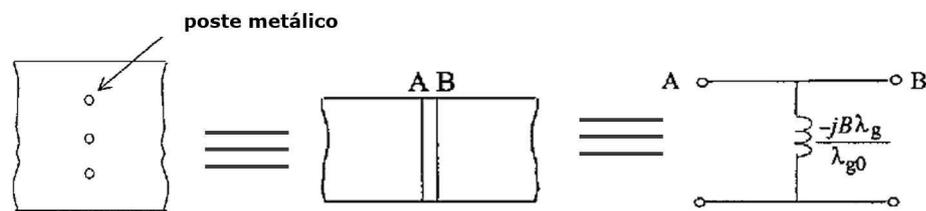


Fonte:(Adaptada) (HUNTER, 2001)

Ressonadores são dispositivos onde ondas estacionárias são formadas em frequências específicas. Essas frequências estão associados aos modos naturais dos ressonadores ou cavidades (POZAR, 2009).

Um poste indutivo embutido em um guia de ondas pode se comportar como um inversor de impedância sobre larguras de banda relativamente amplas (HUNTER, 2001). Dessa forma, a estrutura física apresenta um circuito equivalente que consiste em ressonadores passa-faixa separados por inversores, o que é adequado para filtro passa-faixa. A Figura 11 apresenta a representação equivalente do poste dentro do filtro.

Figura 11 – Representação equivalente do poste no interior do filtro



Fonte: (Adaptada) (HUNTER, 2001)

O tipo de guia de onda utilizado para a construção do filtro pode variar. É possível utilizar tanto guias retangulares como guias circulares, por exemplo, desde que se busque o equilíbrio entre dimensões físicas e fator de qualidade do ressonador.

### 2.4.3 Respostas de Filtros e Parâmetros-S

Conforme apresentado recorrentemente na literatura acerca do estudo de componentes de micro-ondas, linhas de transmissão e antenas, os parâmetros S (parâmetros de espelhamento ou *scattering*) são parâmetros extremamente úteis para avaliar o desempenho e comportamento desses componentes. Para os filtros, esses parâmetros podem ser usados para ajudar a analisar e otimizar as respostas em frequência.

Analisar parâmetros S é uma técnica bastante conhecida de análise de circuitos para projetistas eletrônicos de RF e micro-ondas (MEDIANO, 2018). Normalmente, nessa faixa de frequências, trabalha-se muito com estudo de potência e impedância. Já para baixas frequências normalmente destina-se mais enfoque para grandezas como impedância ( $Z$ ) e admitância ( $Y$ ), além das análises do comportamento de tensão e corrente.

Porém, segundo apresenta MEDIANO (2018) em sua pesquisa, do ponto de vista teórico, todos esses parâmetros podem ser usados de forma equivalente para a análise de resultados.

Existem quatro parâmetros S para um sistema de duas portas. Esses parâmetros são:  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  e  $S_{22}$ . Normalmente esses parâmetros são mensurados em decibéis (dB).

Esses parâmetros podem ser definidos como:

- $S_{11}$  e  $S_{22}$  - Coeficientes de reflexão nas portas 1 e 2, respectivamente;
- $S_{21}$  - Coeficiente de transmissão da porta 1 para a porta 2;
- $S_{12}$  - Coeficiente de transmissão da porta 2 para a porta 1;

A Figura 12 apresenta a representação dos parâmetros S para uma estrutura de filtro com duas portas.

Figura 12 – Representação dos parâmetros S para uma estrutura de filtro



Fonte: (Adaptada) (MEDIANO, 2018)

Considerando um filtro de duas portas, com um sinal (onda) que vai da porta 1 para a porta 2, os parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  indicarão se o sinal será rejeitado ou transmitido pelo filtro. Para os sinais que devem ser rejeitados, deseja-se que o filtro ofereça uma alta incompatibilidade. Logo, para o caso de transmissão da porta 1 para 2, a porta de entrada deve oferecer uma alta reflexão ( $S_{11}$ ). Já para os sinais que deseja-se manter, almeja-se uma boa correspondência e baixa perda, com alta transmissão ( $S_{21}$ ).

Idealmente, quando se quer transmitir uma onda por meio do filtro, busca-se um coeficiente  $S_{11} = -\infty$ . Como isso só é possível utopicamente, um valor de  $S_{11}$  abaixo de -10 dB é considerado satisfatório, pois indica que pelo menos 90% do sinal foi aceito pelo filtro e não foi rejeitado pela porta 1 (MEDIANO, 2018).

Já para o parâmetro  $S_{21}$  é necessário buscar um valor próximo de 0 dB para faixa de sinais que se deseja transmitir, pois isso indica que o sinal vai chegar à porta 2 com mínima atenuação. Nas faixas de sinais que devem ser rejeitados, é necessário buscar um parâmetro  $S_{11}$  próximo de 0 dB idealmente, pois em 0 dB significaria que praticamente todo o sinal nesse faixa seria refletido e não seria transmitido pelo filtro. É importante ressaltar que todos esses valores são caracterizados para impedâncias terminais de  $50\Omega$ .

### 3 Filtro passa-faixa RSIW em banda S

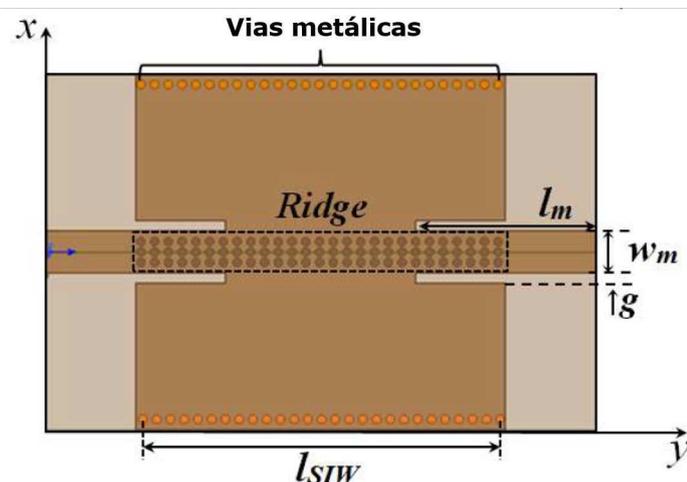
O modelo utilizado como referência para as simulações, modificações e otimizações desenvolvidas no presente trabalho foi o modelo desenvolvido e analisado por SANTOS (2019) em sua pesquisa. A pesquisa deu origem a um artigo, intitulado *Compact Band-Pass Filter with RSIW Cavity* apresentado na 13ª EuCAP (*European Conference on Antennas and Propagation*) em 2019 e faz parte da tese de Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) da aluna Maraiza P. dos Santos, intitulado *Contribuição ao método iterativo das ondas para a análise de estruturas RSIW*, concluído também em 2019.

A estrutura consiste em um filtro passa-faixa com tecnologia RSIW em banda S (2 - 4 GHz). O filtro possui uma cavidade ressonante de modo único. As principais características da estrutura são a sua largura de banda passante, com baixas perdas e tamanho físico compacto (SANTOS, 2019).

#### 3.1 Modelo Estudado

O filtro passa-faixa com tecnologia RSIW em estudo foi projeto utilizando os conceitos apresentados na fundamentação teórica desse trabalho. O filtro foi projetado para atuar na banda S, ou seja, em frequências entre 2 e 4 GHz. O material utilizado como substrato foi o FR-4, pensando-se em realizar a fabricação da placa, utilizando a técnica PCB. O FR4 possui permissividade relativa de  $\epsilon_r = 4.2$ ,  $\delta = 0.2$  e espessura de  $1.52\text{mm}$ . O projeto foi simulado no *software* ANSYS<sup>®</sup> *Electronics Desktop*. A Figura 13 apresenta uma visão 2D da estrutura projetada e simulada.

Figura 13 – Visão 2D do filtro passa-faixa RSIW



Fonte: (Adaptada) (SANTOS et al., 2019)

A Tabela 1 apresenta as dimensões físicas da estrutura SIW para operação no modo dominante  $TE_{01}$ . Já a Tabela 2 apresenta as dimensões físicas do **ridge**, ou seja, da fileira de tocos metálicos que concedem as características da tecnologia RSIW a estrutura.

Tabela 1 – Dimensões físicas da estrutura SIW do filtro passa-faixa

Dimensão	Variável	Valor [mm]
Largura	$a$	33,00
Comprimento	$l$	33,80
Diâmetro da via	$d$	0,83
Largura da transição	$w_m$	4,00
Comprimento da transição	$l_m$	17,00
Distância entre as vias	$p$	1,30

Fonte: (Adaptada) (SANTOS, 2019)

Tabela 2 – Dimensões físicas da fileira de *ridge* do filtro passa-faixa

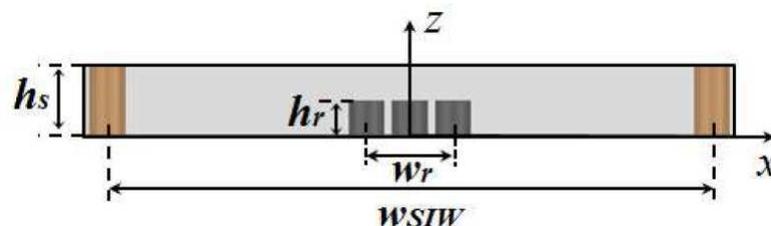
Dimensão	Variável	Valor [mm]
Largura	$a_1$	2,00
Comprimento	$l_1$	33,80
Diâmetro do toco	$d_r$	0,83
Altura do toco	$b_1$	0,80
Distância entre os tocos	$p_r$	1,30
<i>Gap</i>	$g$	1,00

Fonte: (Adaptada) (SANTOS, 2019)

Ao todo são inseridos 81 tocos metálicos, logo, a variável  $N$  que representa o número de tocos, será  $N = 81$ .

A Figura 14 apresenta uma visão transversal da estrutura, com detalhe na inserção das vias metálicas laterais e do *ridge* na parte central do filtro.

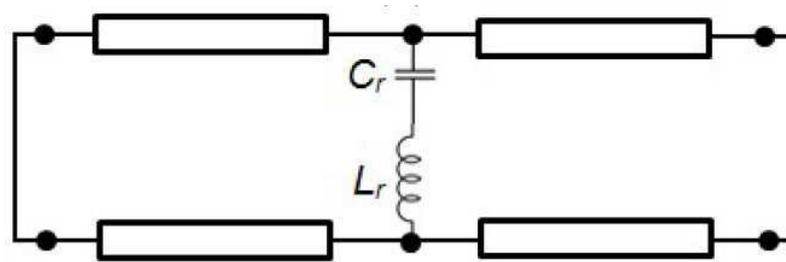
Figura 14 – Visão Transversal do filtro passa-faixa RSIW



Fonte: (SANTOS et al., 2019)

Já a Figura 15 apresenta o circuito elétrico equivalente à estrutura projetada. Nota-se que ele é o mesmo referenciado por CHE et al. (2008b) para estruturas desse tipo.

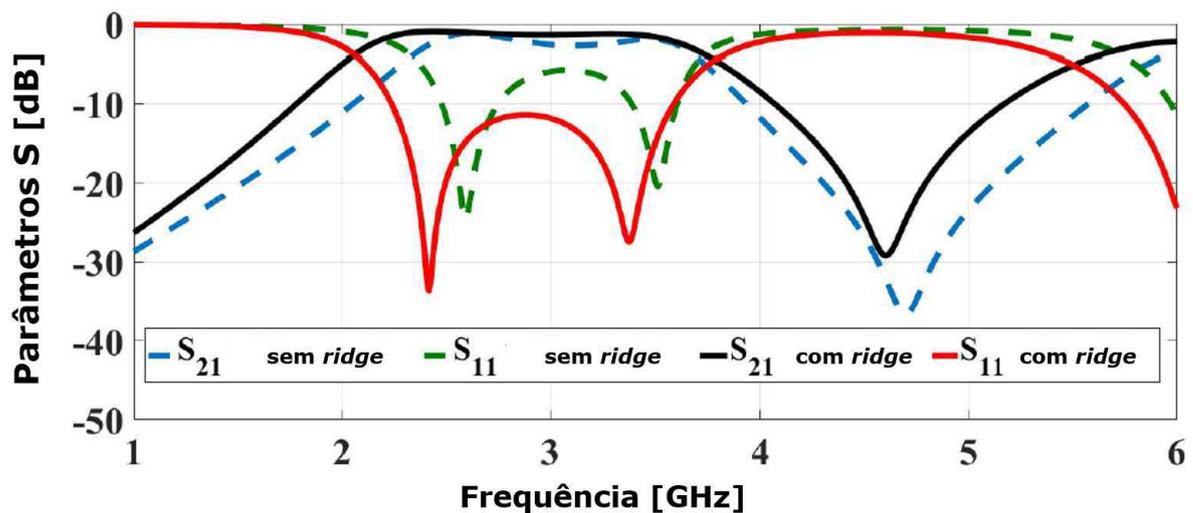
Figura 15 – Circuito equivalente do filtro passa-faixa RSIW



Fonte: (SANTOS et al., 2019)

### 3.2 Resultados Desejados

Após realizadas as simulações, os resultados obtidos para o coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) e para o coeficiente de transmissão ( $S_{21}$ ) estão apresentados na Figura 16.

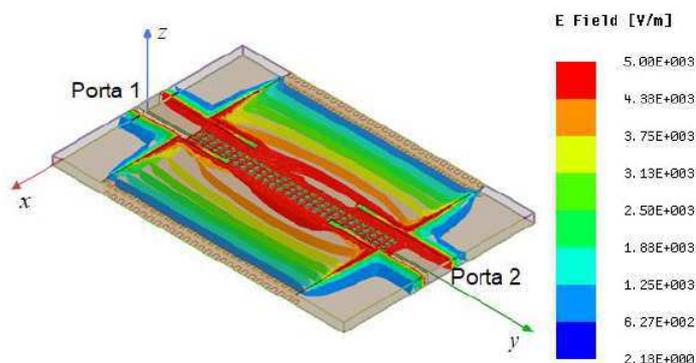
Figura 16 – Resultados simulados dos coeficientes  $S_{11}$  e  $S_{21}$  do filtro, com e sem *ridge*

Fonte: (Adaptada) (SANTOS et al., 2019)

Nota-se que a inserção do *ridge*, conforme esperado, melhora a largura de banda do filtro e desloca a frequência central do filtro para o valor desejado. Além disso, aumenta a magnitude do coeficiente de transmissão na faixa desejada, reduzindo as perdas.

A Figura 17 apresenta os resultados para a distribuição de campo na estrutura obtidos com as simulações.

Figura 17 – Distribuição de campo elétrica obtida como resultado da simulação do filtro passa-faixa



Fonte: (SANTOS et al., 2019)

É possível observar que há uma maior concentração da intensidade do campo elétrico no centro da estrutura, saindo da porta 1 em indo em direção à porta 2. Logo, ocorre uma redução das perdas por irradiação, o que é um resultado condizente com o esperado de acordo com as características da tecnologia RSIW (SANTOS et al., 2019).

## 4 Resultados e Discussões

Após realizar o estudo e análise das estruturas SIW e RSIW, além da análise do modelo de estrutura de SANTOS et al. (2019) utilizado como base para o desenvolvimento do trabalho, foram realizadas as simulações e aplicações de modificações na estrutura.

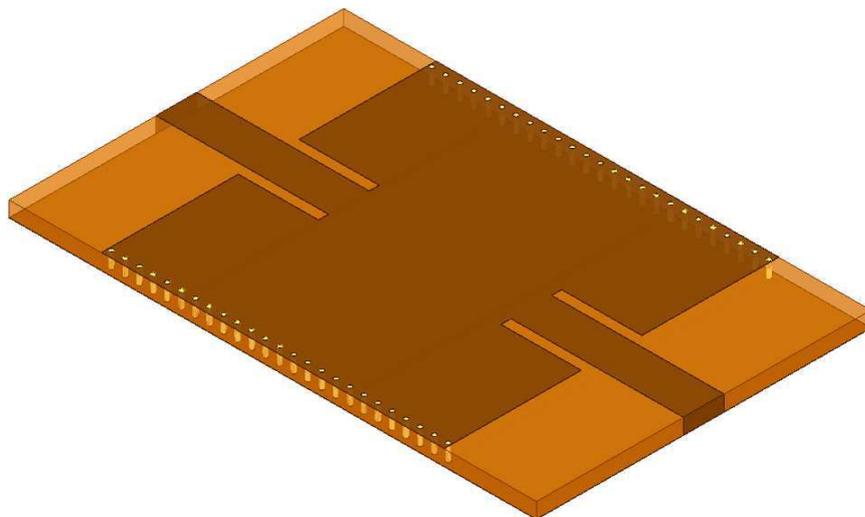
Inicialmente foi realizada a simulação da estrutura SIW, ou seja, um FPF SIW. Foram obtidos e analisados os resultados iniciais, sem modificação, e em seguida realizadas as modificações na estrutura das vias metálicas para análise de efeitos.

Em seguida, foi realizada a simulação da estrutura do FPF RSIW, acrescentando as fileiras de *ridges* na estrutura SIW simulada anteriormente. Da mesma forma, foram obtidos os resultados inicialmente sem modificações, para realizar a comparação com a estrutura modelo e verificar se a estrutura reproduzida funcionava da maneira esperada. Após isso, foram novamente realizadas modificações, dessa vez na estrutura das fileiras de *ridges* para análise de efeitos.

### 4.1 Estrutura de FPF SIW

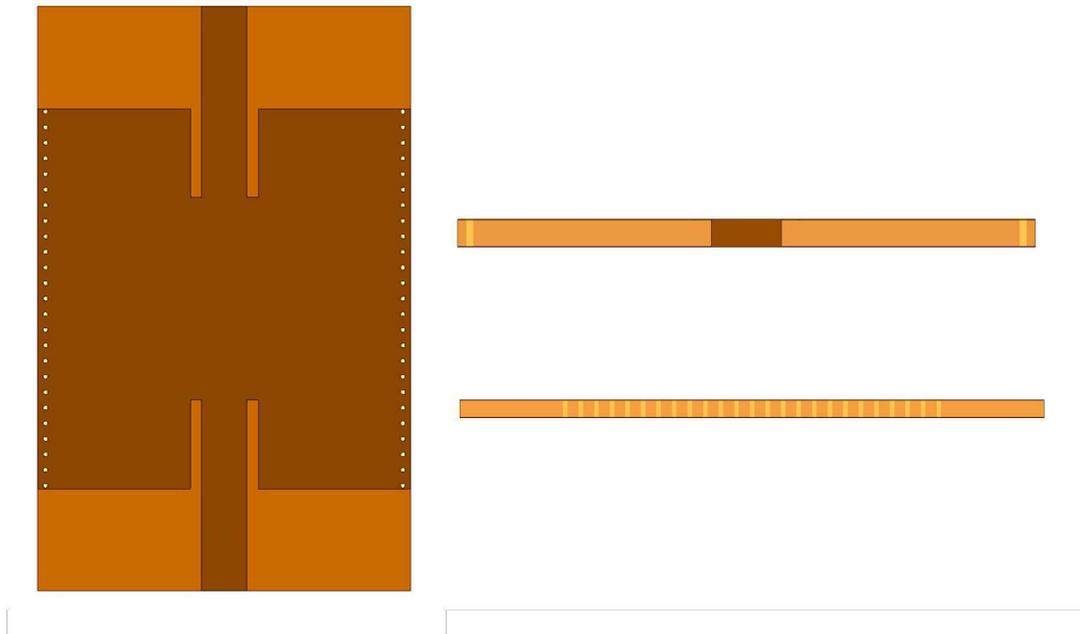
Primeiramente, foi realizada a simulação da estrutura SIW proposta por SANTOS et al. (2019). A Figura 18 apresenta uma vista isométrica da placa. Já a Figura 19 apresenta as vistas superior e das diferentes laterais da estrutura.

Figura 18 – Visualização 3D da estrutura de FPF SIW sem modificações



Fonte: Própria, 2019.

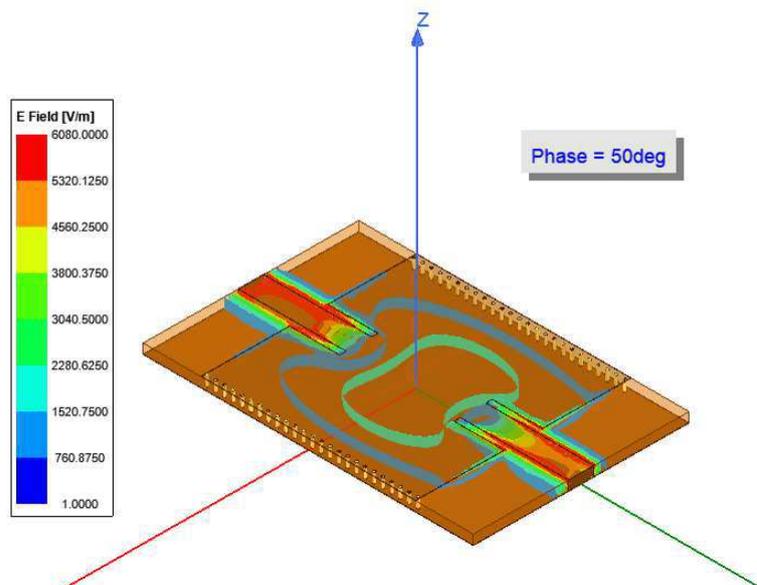
Figura 19 – Visualização superior e lateral da estrutura de FPF SIW sem modificações



Fonte: Própria, 2019.

A Figura 20 apresenta a distribuição do campo elétrico no interior da estrutura. Nota-se que as vias metálicas laterais proporcionam o confinamento do campo entre as laterais da placa, reproduzindo o efeito de um guia de onda metálico clássico. Além disso, por ainda não possuir o *ridge*, ainda não é possível observar a concentração de campo no centro da estrutura. O campo foi observado para a frequência de 3.5 GHz e o resultado da imagem foi capturado para o ângulo de 50 graus.

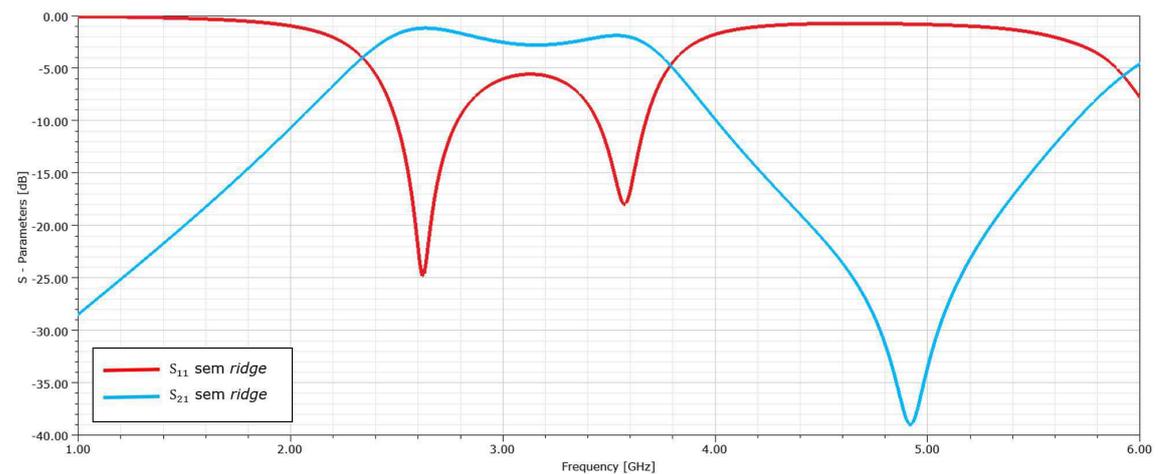
Figura 20 – Distribuição de campo elétrico no interior do FPF SIW



Fonte: Própria, 2019.

Plotando os parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  para o filtro simulado, os resultados obtidos estão apresentados na Figura 21. Nota-se que os resultados obtidos foram iguais aos obtidos no trabalho de SANTOS et al. (2019). Logo, a estrutura inicial foi feita corretamente, possui resultados satisfatórios e pode ser usada como base para a análise de modificações proposta.

Figura 21 – Coeficientes  $S_{11}$  e  $S_{21}$  para o FPF SIW sem modificações



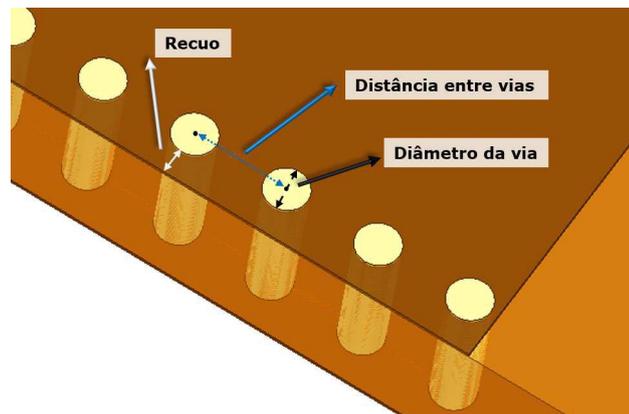
Fonte: Própria, 2019.

#### 4.1.1 Análise de Efeitos de Modificações

Iniciando a análise de efeitos de modificações na estrutura do FPF SIW, optou-se por modificar parâmetros da estrutura que caracterizam fortemente o seu comportamento.

Logo, por tratar-se de uma estrutura SIW, optou-se por aplicar modificações nas vias metálicas da estrutura. Foram modificados: o raio dos cilindros metálicos das vias; a distância entre as vias; o recuo entre as vias e as bordas laterais da estrutura. A Figura 22 apresenta em detalhes as dimensões que foram alvo das modificações.

Figura 22 – Dimensões modificadas para estudo na estrutura SIW



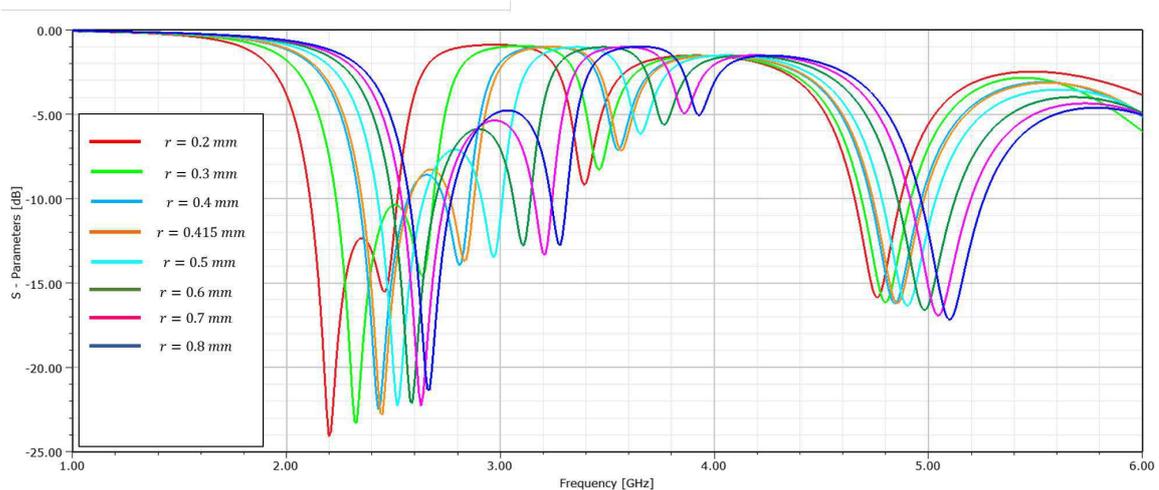
Fonte: Própria, 2019.

Em seguida, foram plotados os resultados para os coeficientes de perdas e transmissão na frequência para analisar como as modificações realizadas influenciam nos resultados do filtro e, conseqüentemente, como é possível, modificando essas dimensões do filtro, chegar a resultados desejados e otimizar seu funcionamento.

#### 4.1.1.1 Variação no Raio das Vias Metálicas

A primeira modificação realizada foi no raio dos cilindros metálicos que formam as vias da estrutura SIW. O valor original utilizado no modelo foi de um diâmetro  $d = 0.83mm$ , logo, um raio  $r = 0.415mm$ . Foi testada uma faixa de valores diferentes para o raio, para analisar a influência da variação dessa dimensão no comportamento do filtro. Os resultados iniciais do coeficiente  $S_{11}$  para essa variação estão apresentados na Figura 23.

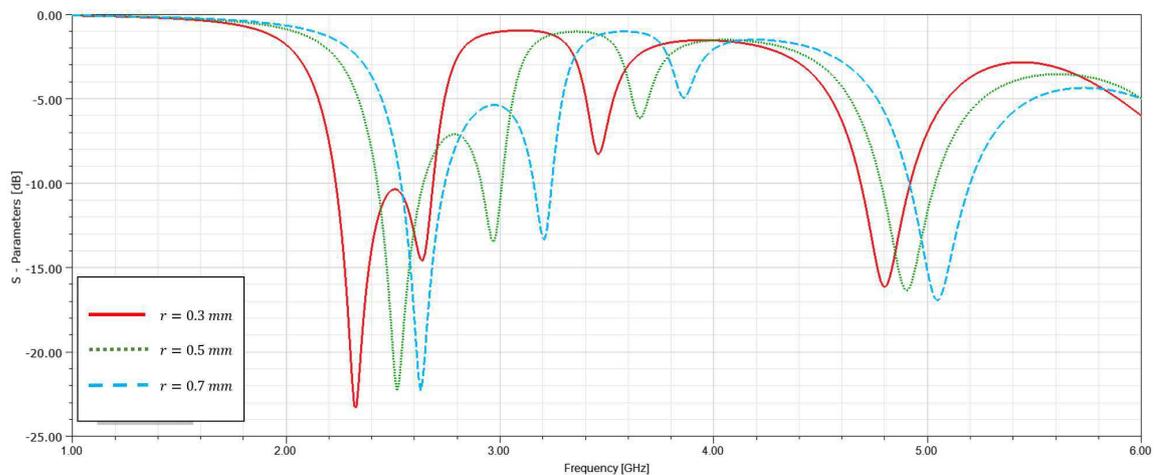
Figura 23 – Resultados iniciais do coeficiente  $S_{11}$  com variação linear do raio das vias



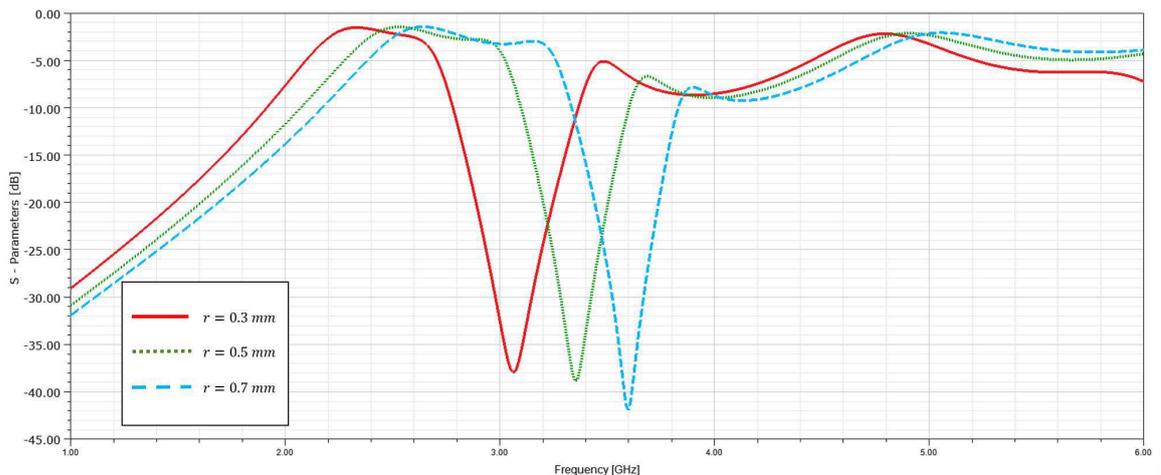
Fonte: Própria, 2019.

Como são várias curvas plotadas simultaneamente, fica mais difícil de visualizar e quantizar os resultados obtidos. Por isso, foram escolhidos três valores da dimensão sendo modificada para que seus resultados fossem plotados e analisados mais claramente. Isso foi feito para todas as modificações.

No caso da variação do raio das vias, os valores escolhidos foram  $r = 0.3mm$ ,  $r = 0.5mm$  e  $r = 0.7mm$ . Os resultados para os coeficientes  $S_{11}$  e  $S_{21}$  estão apresentados na Figura 24 e na Figura 25, respectivamente.

Figura 24 – Resultado do coeficiente  $S_{11}$  com variação do raio das vias

Fonte: Própria, 2019.

Figura 25 – Resultado do coeficiente  $S_{21}$  com variação do raio das vias

Fonte: Própria, 2019.

Nota-se, a partir dos resultados obtidos que, com o aumento do raio das vias metálicas, e conseqüentemente o aumento do diâmetro dos cilindros, aumentam-se as perdas por reflexão, o que pode ser visto pelo aumento da magnitude do coeficiente  $S_{11}$  a medida que o raio cresce.

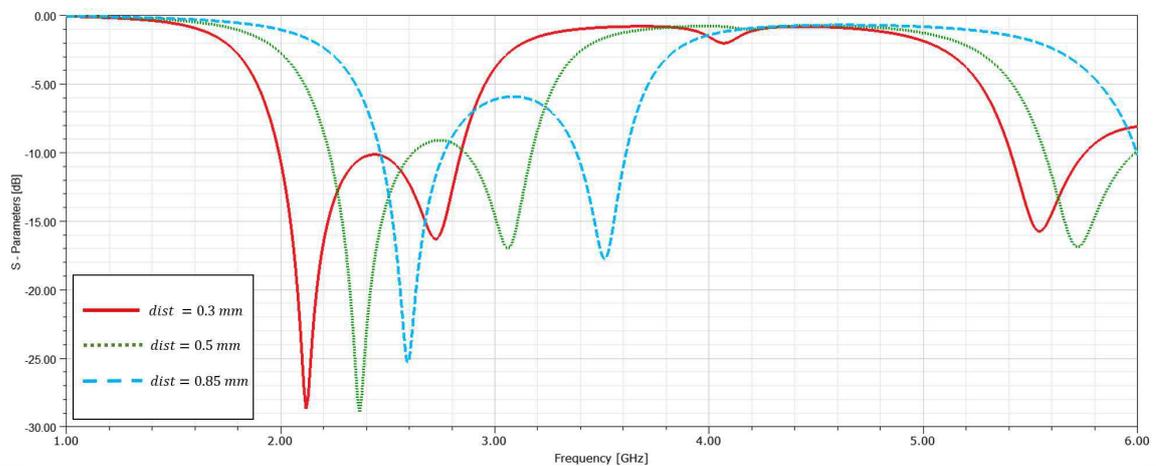
Além disso, analisa-se um deslocamento na frequência do filtro na direção da frequência de 4 GHz. Também é possível observar uma redução considerável da banda de passagem a medida que o raio aumenta, principalmente nas frequências entre 2.5 e 3.5 GHz.

#### 4.1.1.2 Variação na Distância Entre as Vias Metálicas

A modificação realizada em seguida foi na distância entre as vias metálicas (distância centro-a-centro dos cilindros metálicos). Da mesma forma, após realizar uma variação linear dos valores com um determinado passo, foram escolhidos três valores da dimensão sendo modificada para que seus resultados fossem plotados e analisados mais claramente.

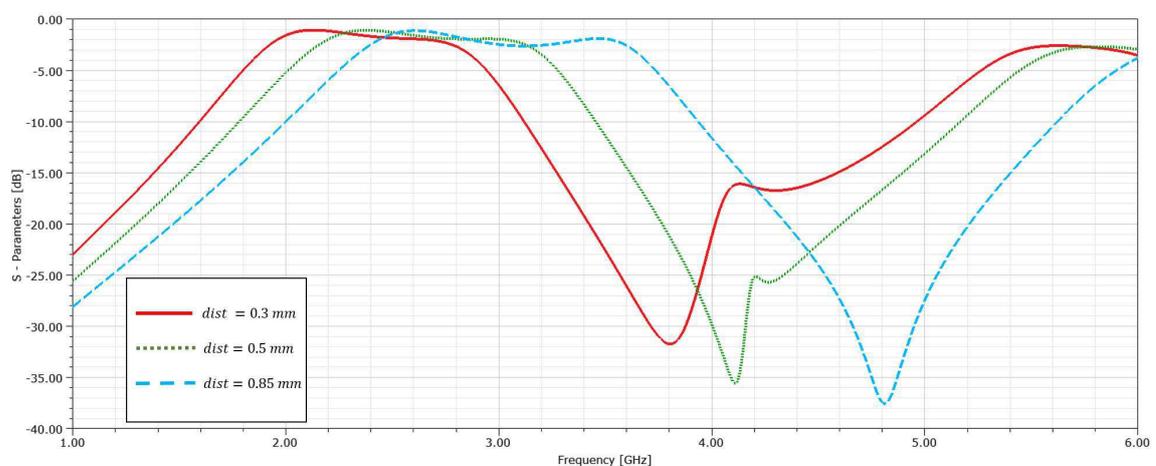
Os valores escolhidos foram  $dist = 0.3mm$ ,  $dist = 0.5mm$  e  $dist = 0.85mm$ . Os resultados para os coeficientes  $S_{11}$  e  $S_{21}$  para essa modificação estão apresentados na Figura 26 e na Figura 27, respectivamente.

Figura 26 – Resultado do coeficiente  $S_{11}$  com variação da distância entre as vias



Fonte: Própria, 2019.

Figura 27 – Resultado do coeficiente  $S_{21}$  com a variação da distância entre as vias



Fonte: Própria, 2019.

Com as variações na distância entre as vias, reduzindo essa distância, visto que a distância original é  $dist = 0.97mm$ , nota-se que ocorre uma redução muito perceptível da banda de passagem na banda S (banda em estudo para a operação do filtro). Isso mostra que, diminuir muito a distância entre as vias, conseqüentemente fechar mais a parede metálica formada por essas vias nas laterais das estruturas, ocasiona mais perdas para o filtro e um banda de passagem menor, o que não é desejável para o componente.

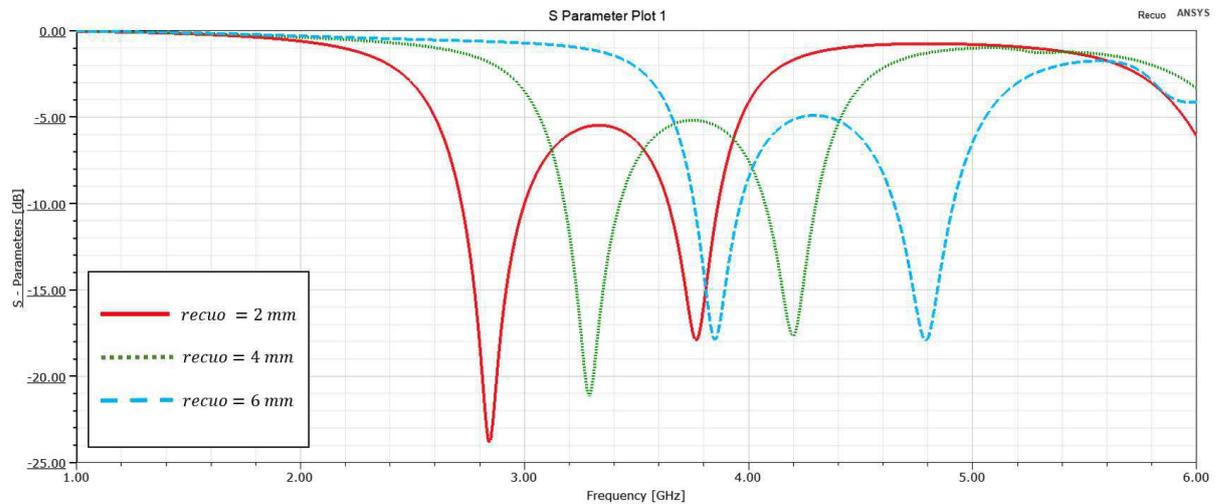
Além disso, também nota-se (assim como na variação do diâmetro das vias) um deslocamento na frequência, quanto menor a distância entre as vias, mais a banda de passagem desloca-se em direção à frequência de 2 GHz.

#### 4.1.1.3 Variação no Recuo das Vias Metálicas em Relação às Laterais da Estrutura

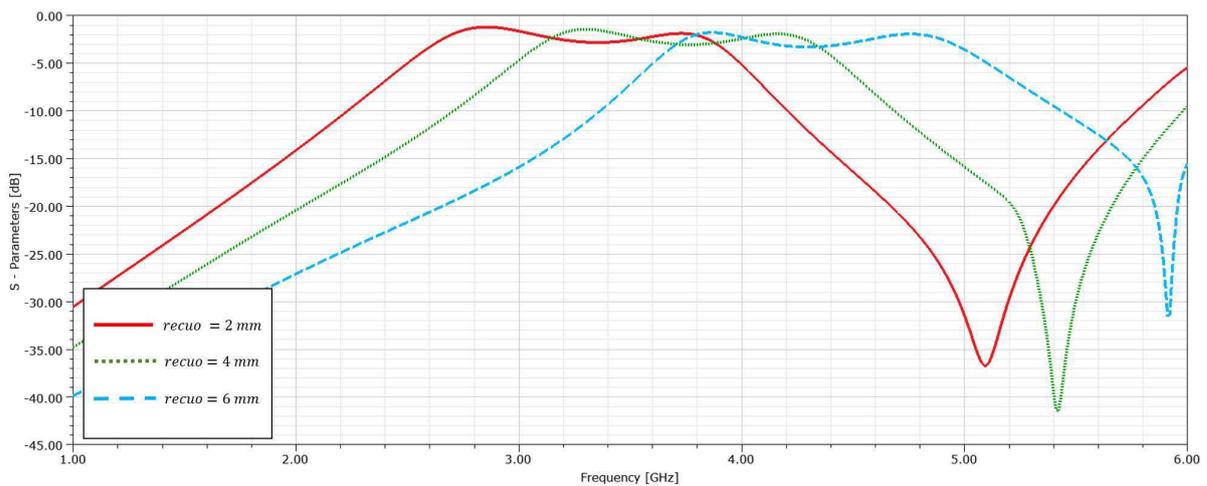
A última modificação realizada na estrutura ainda sem o *ridge* foi na distância entre as vias metálicas e as bordas laterais da estrutura da placa. Novamente, após realizar uma variação linear dos valores com um determinado passo, foram escolhidos três valores da dimensão sendo modificada para apresentar seus resultados.

Essa modificação foi sugerida após constatar, com a revisão bibliográfica acerca desse tipo de estrutura, que existem inúmeras topologias para estruturas SIW. Comparando algumas dessas topologias, percebeu-se que podem existir variações no posicionamento das fileiras de vias metálicas que compõem essa tecnologia, assim como no número de fileiras ou se elas serão realmente fileira retas ou acompanharão outro tipo de geometria.

Assim, para preservar características originais do FPF SIW proposto e facilitar a comparação com os resultados originais obtidos, optou-se (por agora) por não variar o número de fileiras ou sua geometria, apenas o seu posicionamento. A distância original do recuo entre a fileira metálica e as paredes da placa é de  $recuo = 0.97mm$ . Os valores escolhidos para as modificações foram  $recuo = 2mm$ ,  $recuo = 4mm$  e  $recuo = 6mm$ . Os resultados para os coeficientes  $S_{11}$  e  $S_{21}$  para essa modificação estão apresentados na Figura 28 e na Figura 29, respectivamente.

Figura 28 – Resultado do coeficiente  $S_{11}$  com variação do recuo

Fonte: Própria, 2019.

Figura 29 – Resultado do coeficiente  $S_{21}$  com a variação do recuo

Fonte: Própria, 2019.

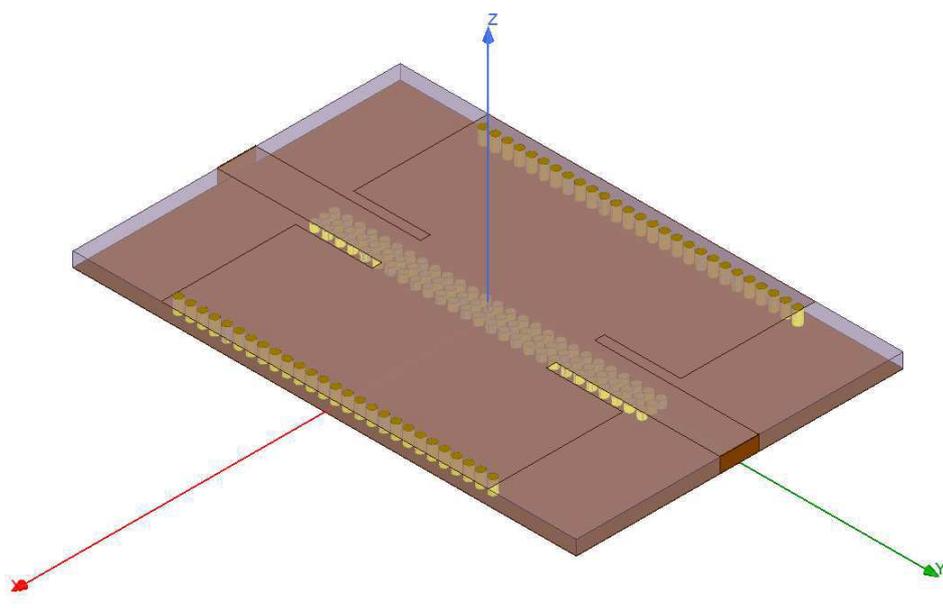
Com a variação do recuo, destaca-se o fato de essa variação que não exerce influência sobre as perdas do filtro. É possível chegar a essa conclusão observando o fato de que as magnitudes dos coeficientes S não variam com a variação do recuo em nenhum momento.

O que ocorre é um deslocamento da banda de passagem, que se desloca para a esquerda (frequências mais altas) conforme aumenta a distância entre a fileira de vias e as paredes laterais do FPF SIW, como pode ser observado na Figura 28. Visto que a distância original é  $recuo \approx 1\text{ mm}$ , observa-se que a variação de  $recuo = 2\text{ mm}$  já causa um leve deslocamento da banda de passagem, porém as variações com acréscimo de mais de 1mm causa resultados ainda mais perceptíveis.

## 4.2 Estrutura de FPF RSIW

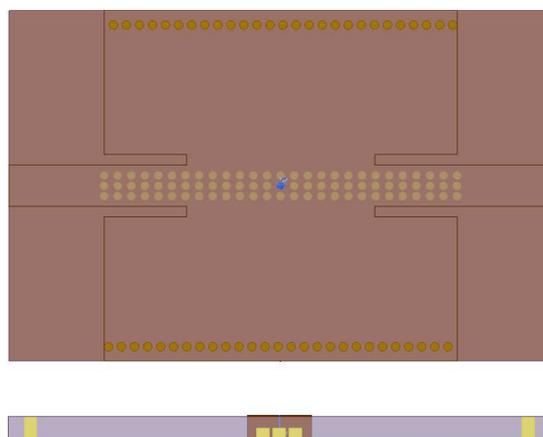
Seguindo o mesmo procedimento realizado para a estrutura de FPF SIW, inicialmente foi realizada a implementação da estrutura RSIW proposta por SANTOS et al. (2019). A Figura 30 apresenta uma vista isométrica da estrutura construída no ANSYS® *Electronics Desktop*. Já a Figura 31 apresenta as vistas superior e lateral da estrutura. Para a estrutura RSIW foram feitas algumas adaptações com relação ao modelo original. O número de vias metálicas laterais foi alterado de 27 para 26 fileiras e distância entre essas vias foi colocada como 1.25 mm, preenchendo toda a lateral da estrutura.

Figura 30 – Visualização 3D da estrutura de FPF RSIW sem modificações



Fonte: Própria, 2019.

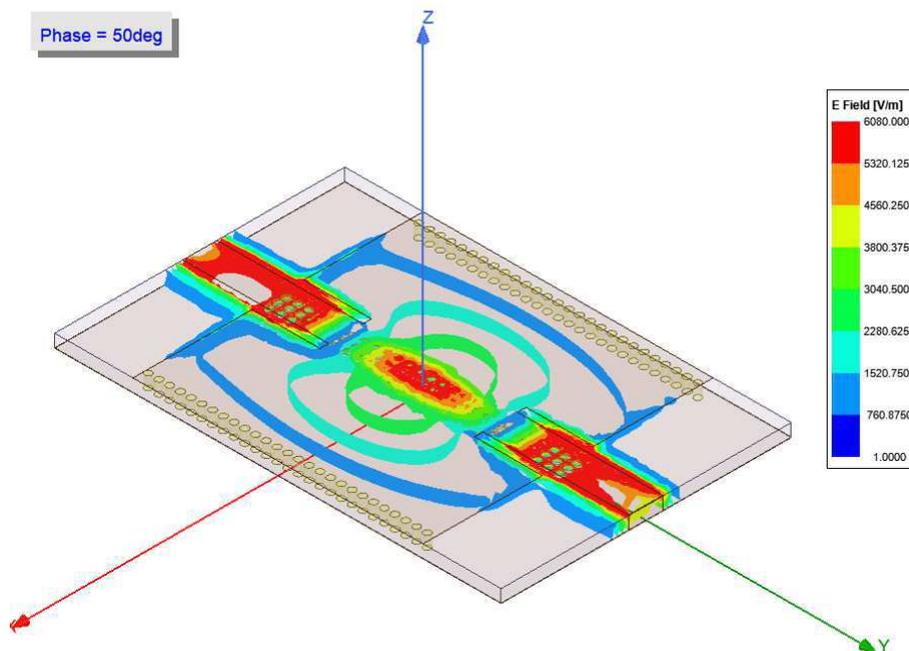
Figura 31 – Visualização superior e lateral da estrutura de FPF RSIW



Fonte: Própria, 2019.

Novamente, plotou-se a distribuição do campo elétrico no interior da estrutura. É possível observar, com a inserção das fileiras de *ridge* no centro da estrutura, a nova caracterização do campo elétrico no interior do filtro. É possível observar a maior concentração de campo no centro da estrutura, seguindo estrutura do *ridge*. O resultado obtido foi semelhante ao encontrado por SANTOS et al. (2019). A Figura 32 apresenta o campo para a frequência de 3.5 GHz. Para efeitos comparativos, o resultado da imagem foi capturado novamente para o ângulo de 50 graus.

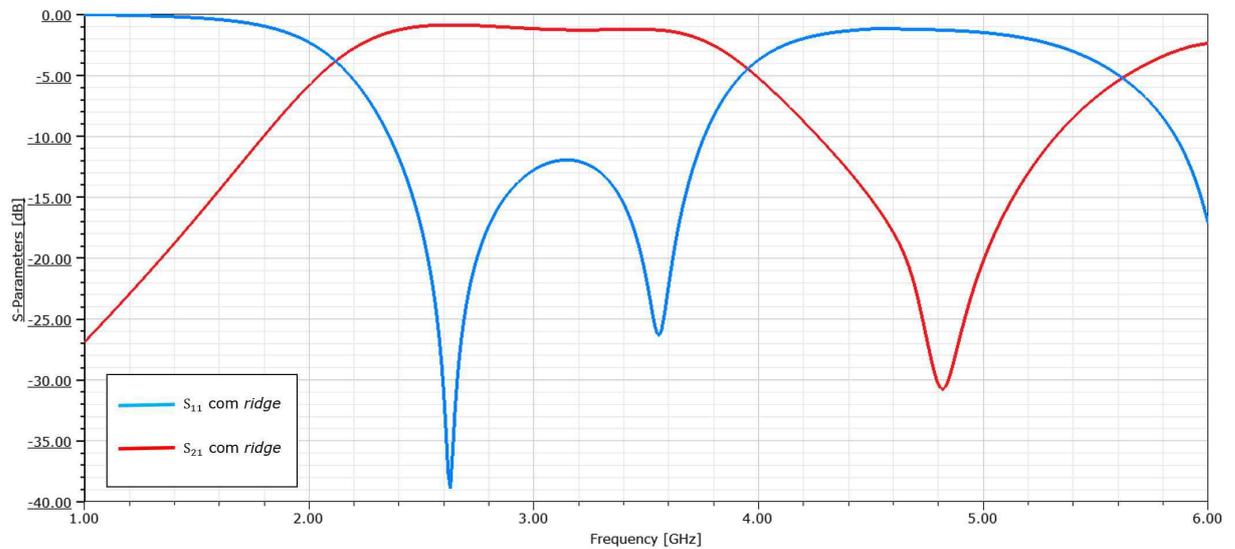
Figura 32 – Distribuição de campo elétrico no interior do FPF RSIW



Fonte: Própria, 2019.

Os resultados obtidos para os parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  para o FPF RSIW estão expressos na Figura 33. É possível observar, comparando as estruturas de FPF RSIW e FPF SIW, que a estrutura RSIW apresenta menos perdas, o que se observa por meio da diminuição na magnitude do coeficiente  $S_{11}$  e na diminuição das distorções no coeficiente  $S_{21}$  no intervalo da banda de passagem. Além disso, nota-se um aumento da banda de passagem e a diminuição da faixa de transição, próximo às frequências de corte laterais do filtro.

Esses resultados são esperados de acordo com os efeitos da inserção do *ridge* e a vantagens da tecnologia RSIW estudados de acordo com a fundamentação teórica desse trabalho. Logo, estão coerentes com a teoria de guias de onda integrados ao substrato e de filtros passa-faixa.

Figura 33 – Coeficientes  $S_{11}$  e  $S_{21}$  para o FPF RSIW sem modificações

Fonte: Própria, 2019.

Os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios por, novamente, se assemelharem aos obtidos no trabalho de SANTOS et al. (2019), cuja estrutura além de simulada, foi fabricada e medida em laboratório, apresentando, assim, resultados validados. A estrutura será, então, usada como base para a análise de modificações proposta.

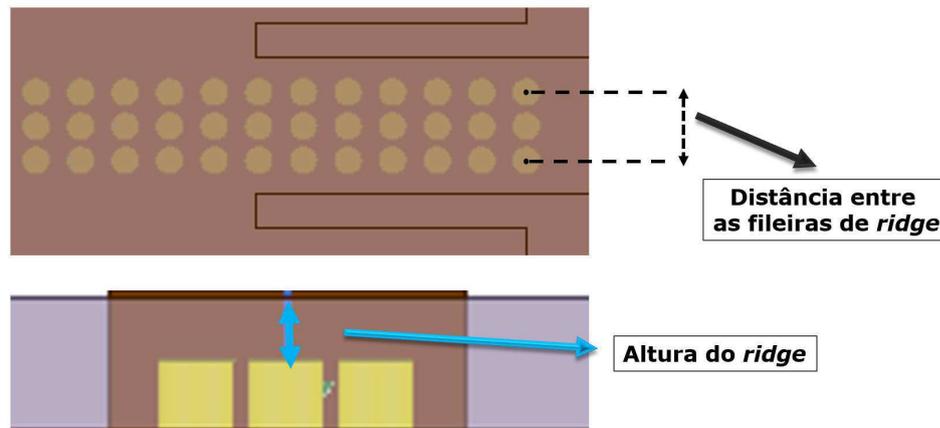
#### 4.2.1 Análise de Efeitos de Modificações

Seguindo os mesmos procedimentos realizados para a estrutura SIW, para a estrutura RSIW optou-se por modificar parâmetros da estrutura que caracterizam fortemente o seu comportamento.

Logo, por se tratar da maior característica de uma estrutura do tipo RSIW, optou-se por realizar modificações nas fileiras de *ridge*. Foram modificados: a altura dos tocos metálicos; o posicionamento das fileiras de tocos. A Figura 34 apresenta em detalhes as dimensões que foram alvo das modificações.

Em seguida, foram analisados os efeitos das modificações sobre os mesmos parâmetros, os coeficientes  $S_{11}$  e  $S_{21}$ .

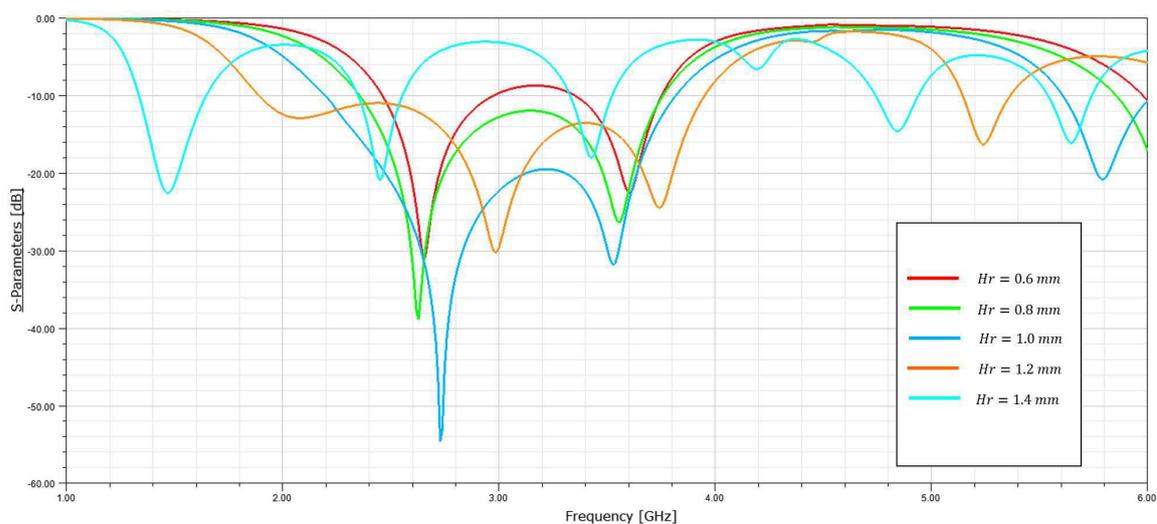
Figura 34 – Dimensões modificadas para estudo na estrutura RSIW



Fonte: Própria, 2019.

#### 4.2.1.1 Variação na Altura dos Tocos Metálicos

A primeira modificação realizada foi na altura dos tocos metálicos que formam as fileiras de *ridge* na estrutura RSIW. O valor original utilizado no modelo foi de  $H_r = 0.8\text{mm}$ . Foi testada uma faixa de valores (entre  $0.6\text{mm}$  e  $1.4\text{mm}$  com um passo de  $0.2\text{mm}$ ) para a altura. Os resultados iniciais do coeficiente  $S_{11}$  para essa variação estão apresentados na Figura 35.

Figura 35 – Resultados iniciais do coeficiente  $S_{11}$  com variação linear da altura dos tocos metálicos

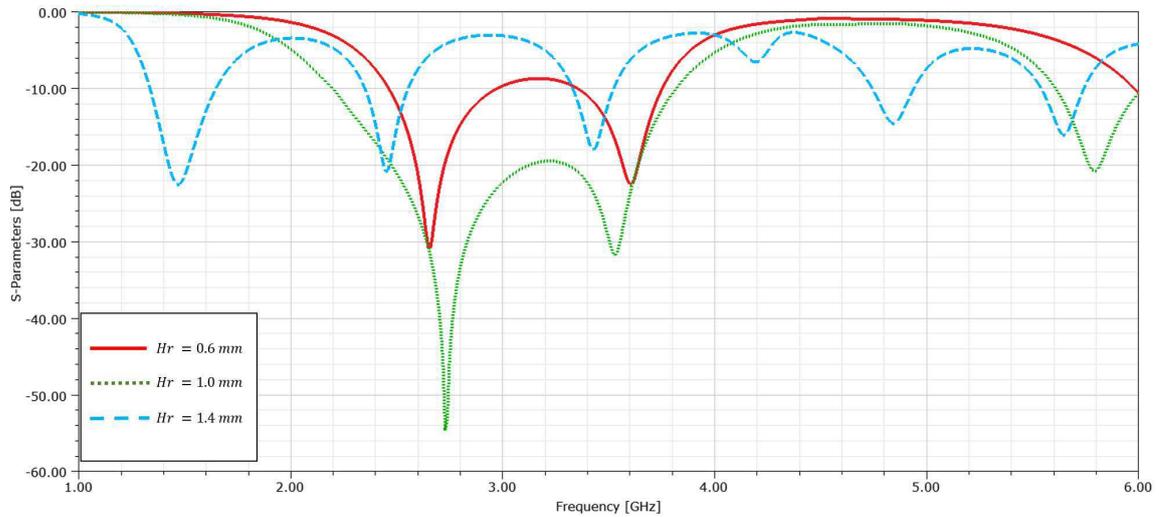
Fonte: Própria, 2019.

Para garantir uma melhor visualização e possibilitar a análise das curvas, foram escolhidos três valores da dimensão sendo modificada para que seus resultados fossem

apresentados. O procedimento foi seguido dando continuidade a metodologia de resultados escolhida para apresentar os resultados obtidos para a estrutura SIW.

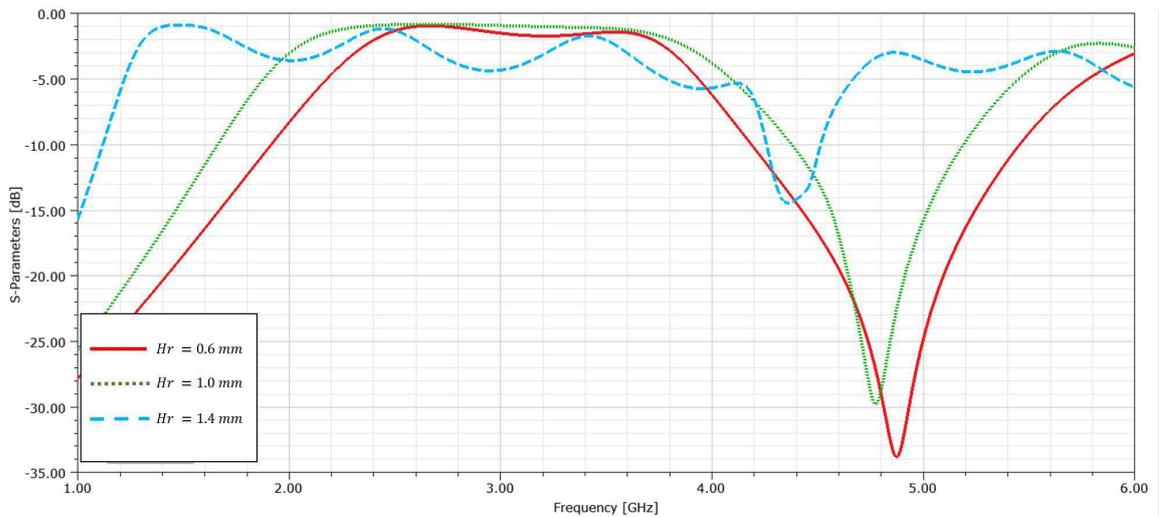
Os valores escolhidos foram  $H_r = 0.6mm$ ,  $H_r = 1.0mm$  e  $H_r = 1.4mm$ . O valor mínimo de  $H_r = 0.6mm$  foi escolhido por ser o mínimo valor que pode ser reproduzido para a fabricação manual da placa com os recursos disponíveis no laboratório utilizado para a realização do trabalho. Os resultados para os coeficientes  $S_{11}$  e  $S_{21}$  estão apresentados na Figura 36 e na Figura 37, respectivamente.

Figura 36 – Resultado do coeficiente  $S_{11}$  com variação da altura dos tocos metálicos



Fonte: Própria, 2019.

Figura 37 – Resultado do coeficiente  $S_{21}$  com variação da altura dos tocos metálicos



Fonte: Própria, 2019.

A partir dos resultados obtidos, como foram feitas variações tanto aumentando quanto diminuindo a altura do *ridge* em relação à altura original ( $Hr = 0.8mm$ ), é possível fazer algumas considerações a respeito do efeito dessas modificações. Analisando os gráficos de  $S_{11}$  e  $S_{21}$  obtidos é possível analisar que:

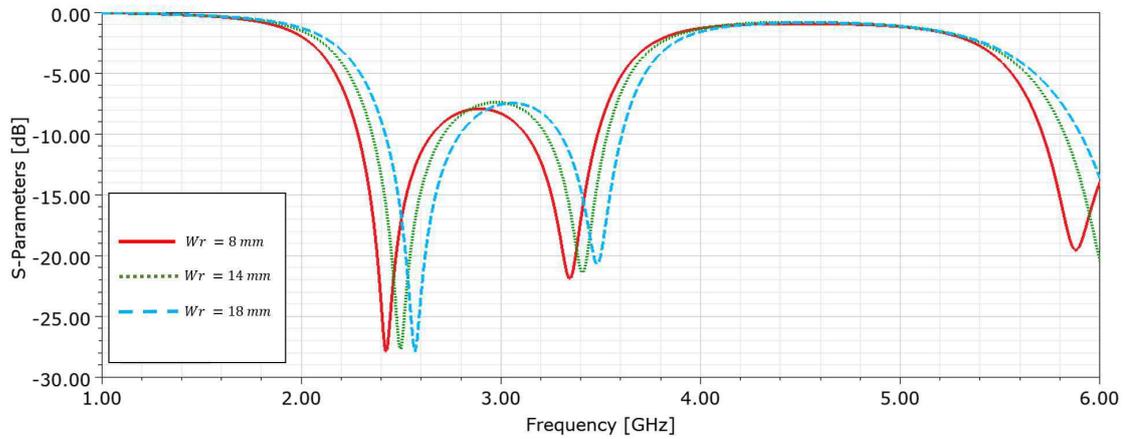
- Para a altura de  $1.4mm$  o filtro perde suas características, não desempenhando mais seu funcionamento corretamente. Uma altura muito grande não gera o efeito capacitivo esperado e compromete a implementação do filtro por meio da tecnologia RSIW. Isso acontece porque, com uma altura muito próxima da espessura do substrato (nesse caso,  $1.52mm$ ) o *gap* formado é muito pequeno e não é suficiente para gerar uma capacitância equivalente;
- Para a altura de  $1.0mm$  nota-se que o filtro ainda mantém suas características de funcionamento, mas possui algumas distorções na faixa de transição para as frequências de rejeição do filtro. Dentre os três resultados obtidos, esse é o que apresenta maior banda de passagem.
- Para a altura de  $0.6mm$  o filtro se comporta como o esperado dentro da faixa de frequências de interesse, porém possui perdas maiores (visto que o coeficiente  $S_{11}$  possui uma maior magnitude).

Além disso, analisa-se um leve deslocamento na frequência do filtro na direção da frequência de 4 GHz a medida que aumenta-se a altura do toco metálico. Assim, conclui-se que a altura do *ridge* afeta diretamente a banda de passagem do filtro, além de ser dimensão fundamental para preservar as características da tecnologia RSIW (como gerar efeito capacitivo e melhorar a largura de banda do filtro).

#### 4.2.1.2 Variação na Posição das Fileiras de *Ridges*

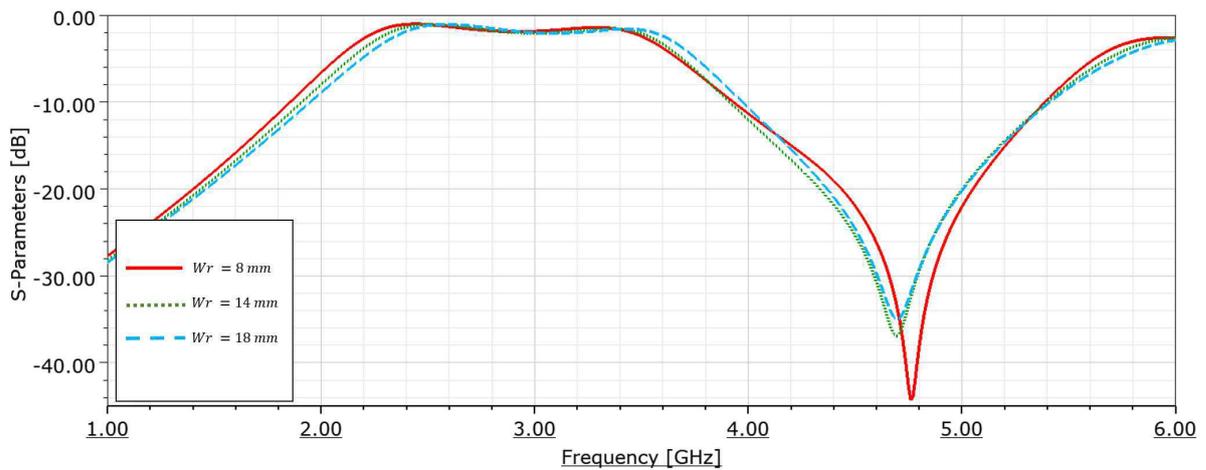
A última modificação realizada foi na distância entre as fileiras de *ridges* centrais. O valor original utilizado no modelo foi de  $W_r = 2.0mm$ . Esse valor corresponde à distância entre o centro da fileira de tocos central para cada fileira lateral, conforme apresentado na Figura 2. Foram testados os novos valores de  $W_r = 8.0mm$ ,  $W_r = 14.0mm$  e  $W_r = 18.0mm$ , ou seja, as fileiras laterais foram cada vez mais afastadas da fileira central. Os resultados do coeficientes  $S_{11}$  e  $S_{21}$  para essa modificação estão apresentados na Figura 38 e na Figura 38, respectivamente.

Figura 38 – Resultado do coeficiente  $S_{11}$  com variação da distância entre as fileiras de *ridges*



Fonte: Própria, 2019.

Figura 39 – Resultado do coeficiente  $S_{21}$  com variação da distância entre as fileiras de *ridges*



Fonte: Própria, 2019.

A partir dos resultados obtidos, nota-se que, para essa dimensão, aumentando muito a distância com relação ao eixo central de fileiras de tocos, a diferença de efeito para os coeficientes do filtro é mínima. Os melhores resultados obtidos ainda são para o valor mínimo dentre os três valores testados, onde a atenuação é maior na banda de rejeição.

Além disso, nota-se que há um leve deslocamento em frequência para as respostas do filtro após essa variação, e as diferenças de magnitudes das perdas por reflexão também não são muito expressivas. Para esse parâmetro, recomenda-se manter as dimensões originais propostas no modelo.

## 5 Conclusões e Propostas para trabalhos futuros

Neste trabalho foram estudadas as teorias acerca de guias de onda clássicos, filtros, tecnologias SIW e RSIW. Em seguida, foi apresentado um modelo de filtro passa-faixa RSIW proposto em tese de doutorado e artigo, publicado e apresentado no 14º EuCAP (*European Conference on Antennas and Propagation*) e baseado na teoria dos modelos clássicos. O modelo proposto foi usado como base para projetar e simular as estruturas analisadas nesse trabalho.

Inicialmente, foi realizada a simulação do modelo original somente com a tecnologia SIW (sem *ridge*), sem nenhuma modificação. Os resultados obtidos foram uma largura de banda de 1.3 GHz a -3 dB e 1.97 GHz a -10 dB. Além disso, foram obtidos um coeficiente de reflexão mínimo de -25 dB ( $S_{11}$ ) e um coeficiente de transmissão máximo de -1.3 dB ( $S_{21}$ ). Em seguida, foram realizadas modificações na estrutura para analisar o efeito dessas modificações sobre o parâmetro do filtro. Os parâmetros modificados foram: raio das vias metálicas; distância entre as vias; e recuo das vias em relação às laterais da estrutura. Foi possível perceber que esses parâmetros influenciam diretamente no comportamento do filtro, melhorando ou piorando seu desempenho.

Para essas modificações, os principais efeitos observados foram o deslocamento em frequência das resposta do filtro, o aumento (ou diminuição) da largura de banda do filtro e a variação da quantidade de perdas.

Em seguida, foi realizado o mesmo procedimento para o filtro RSIW. Inicialmente foram implementadas, adaptando a estrutura SIW já projetada, as fileiras de *ridges*. Foram realizadas as mesmas simulações feitas para a estrutura SIW. Os resultados obtidos, para a estrutura do FPF RSIW sem alterações, foram uma largura de banda de 1.67 GHz a -3 dB e 2.51 GHz a -10 dB. Além disso, foram obtidos um coeficiente de reflexão mínimo de -39,02 dB ( $S_{11}$ ) e um coeficiente de transmissão máximo de -0.88 dB ( $S_{21}$ ). Foi atingida um aumento de cerca de 0.35 GHz na largura de banda, após a implementação FPF RSIW. Logo, observa-se que os valores obtidos para os parâmetros S da estrutura RSIW são melhores que os valores obtidos para a estrutura SIW, para esta aplicação.

Novamente foram realizadas modificações na estrutura, sendo os parâmetros modificados: altura dos tocos metálicos; e distância e posicionamento das fileiras de *ridges*. Observando a alteração da altura foi possível comprovar o efeito capacitivo gerado pelo *gap* entre o toco metálico e a placa metálica superior da estrutura. Foi possível, também, observar como a inserção do *ridge* altera a largura de banda, conforme apresentado na

teoria estudada para esse tipo de tecnologia.

Com a realização desse trabalho foi possível comprovar que as estruturas SIW e RSIW são extremamente sensíveis a alterações sobre suas dimensões, ainda que milimétricas. A estrutura RSIW proporciona vantagens sobre as demais tecnologias, um maior controle da largura de banda e redução das perdas, além de alta concentração de campo no centro do guia de ondas. Porém, esse tipo de estrutura também apresenta uma fabricação mais complicada que requer métodos específicos para que seja possível sua construção.

Além disso, é importante ressaltar que os valores obtidos no modelo utilizado como base ainda são considerados os melhores valores para a estrutura desejada, dentre os valores testados com as modificações. Logo, o trabalho realizou uma análise paramétrica para estudo da variação de resultados a partir de modificações dimensionais na estrutura.

Como sugestão de trabalhos futuros, primeiramente, realizar a fabricação das placas aplicando as modificações que apresentaram efeitos e resultados mais satisfatórios em comparação com as estruturas originais usadas como modelo. Após fabricadas, pode-se realizar as medições dos parâmetros das estruturas para validação de resultados. Além disso, seria válido fazer modificações no preenchimento das vias metálicas e do *ridge*, como por exemplo, o tipo de material utilizado. Por fim, uma outra sugestão seria propor outro(s) tipo(s) de geometria(s) das vias metálicas que compõe a estrutura.

# Referências

- ALHZZOURY, A. I. **Contribution à la Modélisation des Structures SIW et Sinrd Pour Application Micro-Ondes et Télécommunication.** *Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, FR, 2013.* Citado na página 23.
- BOZZI, M.; GEORGIADIS, A.; WU, K. **Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas.** *IET Microwaves, Antennas Propagation*, v. 5, n. 8, p. 909, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 16, 23, 24 e 29.
- BOZZI, M.; WINKLER, S.; WU, K. **Broadband and compact ridge substrate-integrated waveguides.** *IET Microwaves, Antennas Propagation*, v. 4, p. 1965–1973, 2010. Citado na página 25.
- CHE, W. et al. **Analytical equivalence between substrate-integrated waveguide and rectangular waveguide.** *IET Microwaves, Antennas Propagation*, v. 2, n. 1, p. 35–41, 2008. Citado na página 27.
- CHE, W. et al. **Propagation and band broadening effect of planar integrated ridged waveguide in multilayer dielectric substrates.** *2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, p. 217–220, 2008. Citado 6 vezes nas páginas 24, 25, 26, 27, 28 e 35.
- CHE, W. et al. **Investigations on Propagation and the Band Broadening Effect of Ridged Rectangular Waveguide Integrated in a Multilayer Dielectric Substrate.** *IET Microwaves, Antennas And Propagation*, v. 4, p. 674–684, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 15, 26, 28 e 29.
- CHENG, D. K. **Field and wave electromagnetics.** [S.l.]: Pearson Education India, 1989. Citado na página 27.
- CHOW, Y. L.; TANG, W. C. **Development of CAD formulas of integrated circuit components-simplified formulation followed by rigorous derivation.** *2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.00CH37017)*, v. 2, p. 977–980 vol.2, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- DENG, S.; XU, F.; YANG, L. **A compact bandpass filter with transmission zero based on SIW triangular cavities.** *2016 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, p. 1–3, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- DESLANDES, D.; WU, K. **Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide.** *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 54, n. 6, p. 2516–2526, 2006. Citado na página 21.
- ELFADL, A. et al. **Analysis and Design of Narrow Band Filters for Telecommunications Applications.** *Journal of Telecommunications*, v. 17, n. 1, 2012. Citado na página 30.

- HUNTER, I. C. **Theory and Design of Microwave Filters**. Iet, n. 48, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- KUMAR, H.; JADHAV, R.; RANADE, S. **A Review on Substrate Integrated Waveguide and its Microstrip Interconnect**. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, v. 3, n. 5, p. 36–40, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 15, 21 e 24.
- LEWIN, L. **Theory of waveguides: Techniques for the solution of waveguide problems**. New York, Halsted Press, 1975. 356 p., 1975. Citado na página 19.
- MEDIANO, A. **S-parameters and EMI Filter Response**. In Compliance Magazine, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- MOSCATO, S. et al. **Two-Material Ridge Substrate Integrated Waveguide for Ultra-Wideband Applications**. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 63, n. 10, n. 10, p. 3175–3182, 2015. Citado na página 24.
- NWAJANA, A. O.; DAINKEH, A.; YEO, K. S. K. **Substrate integrated waveguide (SIW) bandpass filter with novel microstrip-CPW-SIW input coupling**. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 16, n. 2, p. 393–402, 2017. Citado na página 22.
- PARMENT, F. **Guides d’onde Intégrés au Substrat (SIW) multicouches à haute performance pour des circuits millimétriques à faible coût**. *Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Grenoble Alpes*, 2016. Citado na página 29.
- POZAR, D. M. **Microwave engineering**. John Wiley & Sons, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 20, 29, 30 e 32.
- RABAH, M. A. **Contribution à la Conception et à la Réalisation des Composants Micro-ondes Compacts en Technologie Guides d’Ondes Intégrés aux Substrats: Modélisation par la Méthode des Eléments Finis 2D**. *Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, Faculté de Technologie*, v. 3, n. 5, p. 6–40, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 21.
- SANTOS, M. P. **Contribuição ao método iterativo das ondas para a análise de estruturas RSIW**. *Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)*, p. 75–99, 2019. Citado 6 vezes nas páginas 21, 25, 26, 30, 34 e 35.
- SANTOS, M. P. et al. **Compact Band-pass Filter with RSIW Cavity**. *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, p. 1–4, 2019. Citado 9 vezes nas páginas 34, 35, 36, 37, 38, 40, 46, 47 e 48.
- STRATTON, J. A. **Théorie de l’Electromagnétisme**. [S.l.]: Dunod, 1961. Citado na página 19.
- WHINNERY, J. R.; JAMIESON, H. W. **Equivalent Circuits for Discontinuities in Transmission Lines**. *Proceedings of the IRE*, v. 32, n. 2, p. 98–114, 1944. Citado na página 28.

---

WU, K.; DESLANDES, D.; CASSIVI, Y. **The substrate integrated circuits - a new concept for high-frequency electronics and optoelectronics.** *6th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service*, p. P-III, 2003. Citado na página 15.