



Diego Cássio Garcia Fernandes

**SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA
CONTINUAMENTE RECONFIGURÁVEIS ASSOCIANDO AS
GEOMETRIAS DIPOLO E ESTRELA DE QUATRO BRAÇOS**

**João Pessoa - PB
Março de 2021**

Diego Cássio Garcia Fernandes

**SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA
CONTINUAMENTE RECONFIGURÁVEIS ASSOCIANDO AS
GEOMETRIAS DIPOLO E ESTRELA DE QUATRO BRAÇOS**

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

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Alfrêdo Gomes Neto, Dr.
Orientador

João Pessoa – PB
Março de 2021

Diego Cássio Garcia Fernandes

**SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA
CONTINUAMENTE RECONFIGURÁVEIS ASSOCIANDO AS
GEOMETRIAS DIPOLO E ESTRELA DE QUATRO BRAÇOS**

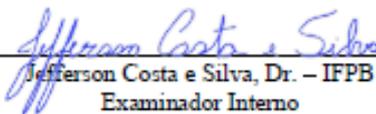
Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Dissertação de mestrado defendida e aprovada em 14 / 07 / 2021

BANCA EXAMINADORA



Alfredo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Orientador



Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Examinador Interno

Alexandre Jean
René Serres

Assinado de forma digital por
Alexandre Jean René Serres
Dados: 2021.07.15 17:15:55 -03'00'

Alexandre Jean René Serres, Dr. – UFCG
Examinador Externo

João Pessoa – PB
Julho de 2021

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

F363s Fernandes, Diego Cássio Garcia .

Superfícies seletivas em frequência continuamente reconfiguráveis associando as geometrias dipolo e estrela de quatro braços / Diego Cássio Garcia Fernandes. – 2021.

66 f. : il

Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2021.

Orientação : Prof^o D.r Alfrêdo Gomes Neto.

1. Superfície seletiva em frequência reconfigurável. 2. Estrela de quatro braços . 3. Dipolo. 4. Varactores. I. Título.

CDU 621.396.67(043)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido forças e conhecimentos para chegar até onde cheguei, por sustentar minha fé e sempre me dar o conforto para nunca desistir dos meus sonhos e enfrentar todos os obstáculos de cabeça erguida. À minha fiel intercessora, Maria, por todas intercessões e amparos que sinto que vem de ti.

Agradeço também a minha família por toda a força e apoio emocional que chega até a mim, mesmo com toda a distância que enfrentamos, o amor nunca diminui. Obrigado por me entenderem e me apoiar em toda essa trajetória, obrigado por me entenderem tão bem, mesmo quando nem eu estou me entendendo, muito obrigado meu pai Antonio, minha mãe Rita e minha irmã Iris.

Agradeço também ao meu orientador Alfrêdo Neto, que sem sua paciência e sem seus conhecimentos e confiança a mim depositados, não teria chegado até onde cheguei e nem ter a bagagem acadêmica que hoje tenho, meu muito obrigado ao senhor, Alfrêdo.

Agradecer também ao meu grupo do mestrado, por todo apoio, companheirismo, unidade e principalmente a amizade formada entre nós, que com certeza será para o resto da vida, meu muito obrigado a vocês, Rávilla, Sara, Laryssa e Ibernou.

Meus amigos de infância e da vida, que considero como verdadeiros irmãos, sempre que preciso nunca hesitam em me ajudar e sabem que podem contar comigo para a vida, Lucas Linhares, Lucas Targino, Nathan Cardoso, Rayssa Maia, Franciclea, Luanna Veras, Sara Beatrice, Yllen Albuquerque, Ramon Dantas e Rodrigo Maciel, dentre vários outros que vivem no meu coração.

Obrigado por tudo, Deus.

“A força não vem de vencer. Suas lutas desenvolvem suas forças. Quando você atravessa dificuldades e decide não se render, isso é força.”

Arnold Schwarzenegger

Resumo

As pesquisas com superfícies seletivas em frequência (FSS) vêm ganhando atenção, com o intuito de, entre outras aplicações, limitar as interferências e otimizar a utilização de antenas. Nesta dissertação é apresentada uma superfície seletiva em frequência reconfigurável, baseado na geometria estrela de quatro braços associada com a geometria dipolo, utilizando como elemento ativo o varactor. A inserção dos dipolos permite recuperar a ressonância na polarização x , suprimida pelas linhas de polarização dos varactores. O projeto das geometrias estrela de quatro braços e dipolo, a associação das geometrias e o modelo do varactor utilizado são descritos. Cada geometria é estudada isoladamente e depois associação dessas geometrias, bem como os efeitos da inserção do varactor e das linhas de polarização dos mesmos. Foi fabricada uma FSS reconfigurável composta por 6×6 células básicas, arranjadas em 6 linhas. Para sintonizar a frequência de ressonância da FSS, é controlada a tensão reversa dos varactores e, conseqüentemente, a capacitância associada a cada célula básica é continuamente modificada. O protótipo foi projetado, caracterizado numericamente, fabricados e por fim, caracterizado experimentalmente, no qual se utilizou o varactor SMV1231. Os resultados numéricos e medidos apresentam uma boa concordância para a resposta em frequência da FSS reconfigurável, obtendo-se uma variação contínua da frequência de ressonância de 3,2 GHz a 4,2 GHz, apresentando uma faixa de variação de 1 GHz, um resultado com potenciais aplicações para os atuais sistemas de telecomunicações.

Palavras-chave: Superfície seletiva em frequência reconfigurável. Estrela de quatro braços. Dipolo. Varactores.

Abstract

The research about frequency selective surfaces (FSS) has been growing in order to limit interference and optimizing the use of antennas. In this research, a reconfigurable frequency selective surfaces is presented, based in the four-armed star geometry associated with the dipole geometry, using the varactor as an active element. Inserting the dipoles allow to regain the resonance in the x polarization, suppressed by the polarization lines of the varactors. The design of the four-armed star and dipole geometries, the geometries association and the used varactor model are described. Each geometry is studied separately and then associated with these geometries, as well as the effects of insertion the varactor and their polarization lines. It was manufactured a reconfigurable FSS composed by 6×6 basic cells, arranged in 6 lines. To tune the FSS resonant frequency, the reverse voltage of the varactors is controlled and, consequently, the capacitance associated with each basic cell is continuously, the capacitance associated with each basic cell is continuously modified. The prototype was designed, numerically characterized, manufactured and finally, experimentally characterized, manufactured and finally, experimentally characterized, in which the varactor SMV1231 was used. The numerical and measured results show a good agreement for the frequency response of the reconfigurable FSS, obtaining a continuous variation of the resonance frequency from 3,2 GHz to 4,2 GHz, featuring a variation range of 1 GHz, a result with potential applications for current telecommunications systems.

Keywords: Reconfigurable frequency selective surface. Four-arms star. Dipole. Varactors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de aplicações no espectro de frequência	15
Figura 2 - Diagrama de radiação com o máximo sendo apontado para direção da demanda ..	16
Figura 3 - Geometrias estrela de quatro braços	17
Figura 4 - Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS.....	19
Figura 5 - FSS do tipo <i>patch</i>	20
Figura 6 - FSS do tipo abertura	20
Figura 7 - Elementos do grupo 1	21
Figura 8 - Elementos do grupo 2	21
Figura 9 - Elementos do grupo 3	21
Figura 10 - Elementos do grupo 4	22
Figura 11 - Elementos do grupo 5	22
Figura 12 - Geometria estrela de quatro braços.....	22
Figura 13 - Geometria matrioska.....	23
Figura 14 - Exemplos de FSS's passiva	23
Figura 15 – Exemplos de FSS's reconfigurável	24
Figura 16 – FSS's eletronicamente reconfigurável	24
Figura 17 – Ilustração de FSS de anteparo fino	25
Figura 18 – FSS de anteparo espesso	25
Figura 19 – FSS utilizada como anteparo na porta do forno de micro-ondas	26
Figura 20 – Antena de banda dupla com sub-refletor usando FSS	26
Figura 21 – Exemplos de FSS como radomes	26
Figura 22 – Paredes inteligentes para melhoria da comunicação sem fio <i>indoor</i>	27
Figura 23 – Sistema RFID com etiqueta e sem chip inspirada em FSS	27
Figura 24 – Modelos do circuito equivalente	28
Figura 25 – <i>Setup</i> de medição de FSS com antenas cornetas.....	29
Figura 26 – <i>Setup</i> de medição de FSS com antenas cornatas associadas a lentes.....	30
Figura 27 – Câmera anecóica	30
Figura 28 – Janela de medição com absorvedores	31
Figura 29 – Janela de medição sem absorvedores.....	31
Figura 30 – Modelos do Varactor.....	32
Figura 31 – Encapsulamento dos Varactores SMV1231	32
Figura 32 – Dimensões do Encapsulamento SC79.....	32
Figura 33 – Capacitância x Tensão reversa.....	33
Figura 34 – Geometria dipolo cruzado	34
Figura 35 – Resposta em frequência do dipolo	35
Figura 36 – Passos para a obtenção da geometria estrela de quatro braços	36
Figura 37 – Resposta em frequência da estrela de quatro braços	37
Figura 38 – Geometria estrela de quatro braços com fenda para a inserção do elemento de comutação.....	37
Figura 39 – Resposta em frequência da estrela de quatro braços com fenda	38

Figura 40 – Linhas de alimentação adicionadas.....	38
Figura 41 – Resposta em frequência da geometria estrela de quatro braços com linhas de alimentação.....	38
Figura 42 – FSS e destaque da célula unitária.....	39
Figura 43 – Resposta em frequência na polarização x	40
Figura 44 – Resposta em frequência na polarização y	40
Figura 45 – Dimensões da geometria proposta.	42
Figura 46 – FSS com geometrias associadas.....	42
Figura 47 – Resposta em frequência, estrela de quatro braços.....	43
Figura 48 – Resposta em frequência, estrela de quatro braços com <i>gap</i>	43
Figura 49 – Resposta em frequência, estrela de quatro braços com <i>gap</i> e linhas de alimentação.	44
Figura 50 – Geometria dipolo.....	45
Figura 51 – Resposta em frequência do dipolo	45
Figura 52 – Resposta em frequência das geometrias dipolo e estrela de quatro braços associadas.	45
Figura 53 – Célula unitária com as geometrias dipolo e estrela de quatro braços associadas com o varactor inserido.	46
Figura 54 – Janela <i>lumped RLC boundary</i>	46
Figura 55 – Resposta em frequência das geometrias dipolo e estrela de quatro braços associadas, $C_{var} = 1,58 \text{ pF}$	47
Figura 56 – Resposta em frequência das geometrias dipolo e estrela de quatro braços associadas, $C_{var} = 0,68 \text{ pF}$	47
Figura 57 – Resposta em frequência das geometrias dipolo e estrela de quatro braços associadas, $C_{var} = 0,5 \text{ pF}$	48
Figura 58 – Comparativo para as diferentes tensões para a polarização x	48
Figura 59 – Comparativo para as diferentes tensões para a polarização y	49
Figura 60 – <i>Setup</i> de medição para a FSS..	49
Figura 61 – Protótipo da FSS..	50
Figura 62 – Resposta em frequência, $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, $V_R = 1\text{V}$ (1.58 pF).....	51
Figura 63 – Resposta em frequência, $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, $V_R = 5\text{V}$ (0.68 pF).....	51
Figura 64 – Resposta em frequência, $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, $V_R = 10\text{V}$ (0.5 pF).....	52
Figura 65 – Resposta em frequência, $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, $V_R = 1\text{V}$ (1.58 pF).....	53
Figura 66 – Resposta em frequência, $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, $V_R = 5\text{V}$ (0.68 pF).....	53
Figura 67 – Resposta em frequência, $ S_{21} (\text{dB}) \times \text{Freq. (GHz)}$, $V_R = 10\text{V}$ (0.5 pF).....	54
Figura 68 – Frequência de ressonância (GHz) \times Tensão reversa (V), Varactor SMV1231.....	55
Figura 69 – Circuito equivalente da FSS considerando a inserção do Varactor.	55
Figura 70 – Resposta em frequência, pol. y , FSS com varactor, V_0	56
Figura 71 – Resposta em frequência, pol. y , FSS com varactor, V_1	57
Figura 72 – Resposta em frequência, pol. y , FSS com varactor, V_2	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Trabalhos utilizando a geometria estrela de quatro braços	17
Tabela 2 - Resultado para a polarização y	52
Tabela 3 - Resultado para a polarização x	54
Tabela 4 - Resultados obtidos para tensão V0.....	56
Tabela 5 – Resultados obtidos para tensão V1	57
Tabela 6 – Resultados obtidos para tensão V2.....	58

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

FSS	<i>Frequency selective surface</i> (Superfície seletiva em frequência)
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i> (Diferenças Finitas no Domínio do Tempo)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
MSM	<i>Method of Moments</i> (Método dos Momentos)
WCIP	<i>Wave Concept Iterative Procedure</i> (Método Iterativo das Ondas)
FR-4	Substrato de fibra de vidro e epóxi, com retardo de chama, tipo 4, <i>Flame Retardant 4</i>
S_{21}	Parâmetro S, equivalente ao coeficiente de transmissão
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i>
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos).
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
ϵ_r	Constante dielétrica relativa, permissividade dielétrica relativa
h	Espessura do substrato
λ_0	Comprimento de onda no espaço livre
W_x	Comprimento da célula na direção x
W_y	Comprimento da célula na direção y
L_x	Comprimento do <i>patch</i> e dos braços da estrela na direção x
L_y	Comprimento do <i>patch</i> e dos braços da estrela na direção y
S_x	Comprimento do ponto de comutação na direção x
S_y	Comprimento do ponto de comutação na direção y
d_{x1}	Comprimento do corte retangular da extremidade do braço na direção x
d_{y1}	Comprimento do corte retangular da extremidade do braço na direção y

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 FSS	19
2.1.1 Classificações das FSS's	19
<i>2.1.1.1 Preenchimento da célula</i>	20
<i>2.1.1.2 Geometria do elemento básico</i>	21
<i>2.1.1.3 Passiva e reconfiguráveis</i>	22
<i>2.1.1.4 Espessura da camada de metalização</i>	24
2.1.2 Aplicações	25
2.1.3 Técnicas de Caracterizações	27
<i>2.1.3.1 Caracterização Numérica</i>	28
<i>2.1.3.2 Caracterização Experimental</i>	29
2.2 DIODOS VARACTORES	31
3. DESCRIÇÃO DO PROJETO	34
3.1 GEOMETRIA DIPOLO	34
3.2 OBTENÇÃO DA GEOMETRIA ESTRELA DE QUATRO BRAÇOS.....	36
3.1 ASSOCIAÇÃO DAS GEOMETRIAS	39
4. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS	41
4.1 RESULTADOS NUMÉRICOS	41
4.1.1 Polarizações x e y	42
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	49
4.3 VARIAÇÃO ANGULAR.....	56
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
5.1 TRABALHOS PUBLICADOS E ACEITOS PARA PUBLICAÇÃO.....	60
REFERÊNCIAS	61

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

No decorrer dos últimos anos, percebe-se que o uso de serviços móveis de telecomunicações tende a crescer exponencialmente. Esse crescimento está associado à evolução e ao desenvolvimento de dispositivos móveis de comunicação, como, por exemplo, *smartphones*, *notebooks*, leitores de livros digitais (*e-readers*), relógios inteligentes (*smartwatches*), drones, entre outros. Além disso, serviços como vídeo *streaming* e a diversificação da Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*) contribuem para o aumento da demanda por taxas de transmissão [1] – [5].

Assim, os serviços e aplicativos desses dispositivos móveis tornam-se cada vez mais dependentes da comunicação sem fio, provocando novas demandas e uma maior concorrência para a utilização do espectro de frequência, desde 700 MHz até 28 GHz, em que são alocadas várias aplicações em diferentes faixas de frequência. Dentre as diversas faixas de frequência, algumas são mais utilizadas, como as faixas de 2,4 GHz e 5,8 GHz, nas quais estão alocados serviços como Wi-Fi, WiMax e WLAN, Figura 1. Neste contexto, têm-se a necessidade de desenvolver dispositivos que operem em diversas faixas de frequências, [6].

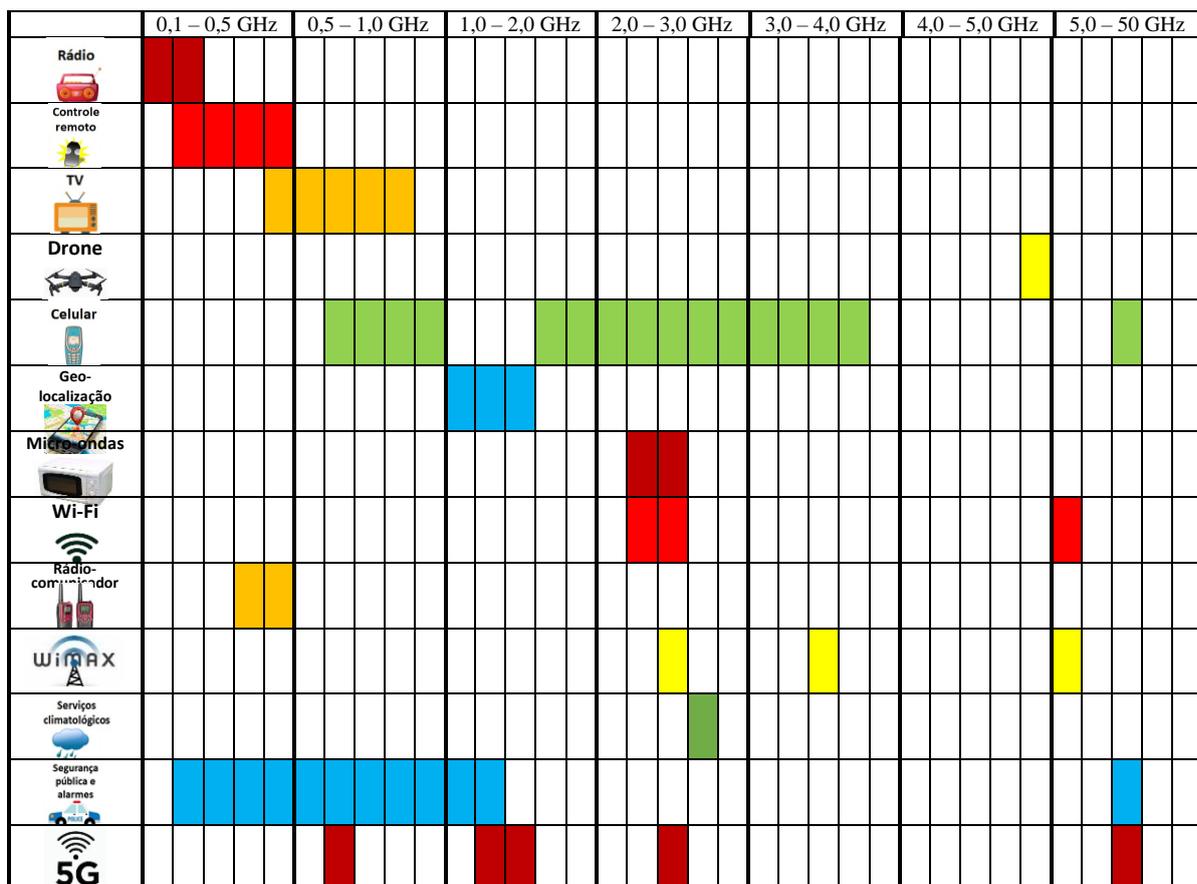


Figura 1- Ilustração de aplicações no espectro de frequência

Considerando essa demanda e as limitações do espectro eletromagnético, bem como restrições do espaço físico para instalação de antenas, faz-se necessário otimizar o número de antenas a serem utilizadas. Por outro lado, em ambientes com grande número de usuários (centro comerciais, prédios de escritórios etc.), é preciso proporcionar soluções para atenuar as interferências e assim assegurar a qualidade dos serviços de comunicações sem fio. Considere-se ainda ambientes sensíveis (hospitais, presídios, embaixadas, entre outros), onde o acesso aos sistemas de comunicações sem fio deve ser restrito e/ou controlado. Para atender a essas especificações, uma possibilidade é usar tecnologias baseadas em superfícies seletivas em frequência, FSS (*frequency selective surfaces*) [7] – [11]. As FSS apresentam resposta em frequência similar a dos filtros, podendo em determinadas frequências refletir, absorver ou deixar passar sinais, permitindo um maior controle das ondas eletromagnéticas [12], [13].

As FSS podem apresentar uma resposta em frequência fixa ou variável. Para uma resposta em frequência variável, pode-se denominar a FSS de reconfigurável. A variação da resposta em frequência da FSS geralmente ocorre pela modificação mecânica ou eletrônica de

seus parâmetros (geometria, dielétrico etc.), como será detalhado mais adiante nesta dissertação.

Uma das aplicações das FSS reconfiguráveis são as antenas inteligentes, o que vêm atraindo a atenção de diversos grupos de pesquisa [11], [14] – [17]. Ao alterar a sua resposta em frequência, as FSS reconfiguráveis, podem modificar a direção do máximo ganho das antenas, otimizando os sistemas telecomunicações, tanto por reduzir a potência irradiada (a energia é direcionada apenas para onde está a demanda), como por minimizar as interferências (com um feixe diretivo, sinais indesejados não são captados, ou são minimizados), Figura 2. Uma das formas de reconfigurar uma FSS é através da incorporação de dispositivos ativos (diodos PIN, varactores, chaves MEMS etc.), que quando polarizados alteram as características eletromagnéticas da FSS, [18], [19].

Neste contexto, considerando os requisitos de ajuste da frequência de operação, assim como as aplicações nos sistemas de telecomunicações, nesta dissertação de mestrado é apresentado o desenvolvimento de uma FSS continuamente reconfigurável, associando as geometrias dipolo e estrela de quatro braços, utilizando varactores como elemento ativo. Dessa forma, a cada geometria está associada uma ou mais faixa de frequência de operação, sendo que a faixa de frequência associada à estrela de quatro braços pode ser continuamente variada. Além disso, a inserção dos dipolos permite recuperar a ressonância na polarização x , suprimida pelas linhas de polarização dos varactores.

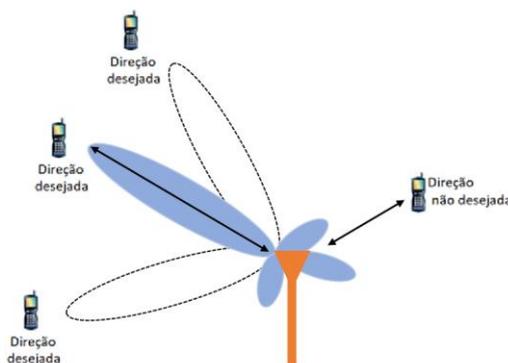


Figura 2 – Diagrama de radiação com o máximo sendo apontado para direção da demanda.

As pesquisas desenvolvidas no Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo aplicado, do IFPB (GTEMA-IFPB) têm investigado e proposto novas FSS reconfiguráveis, utilizando como elemento ativo tanto diodos PIN, como varactores, associando esses elementos a diferentes geometrias, com o objetivo de contribuir para a evolução tecnológicas dessas estruturas [20] – [22]. Dentre as geometrias estudadas no GTEMA, a estrela de quatro braços,

Figura 3, apresenta interessantes características de miniaturização e comutação [21], [23], [24]. Em [25] é apresentado um resumo da evolução dos trabalhos utilizando a geometria estrela de quatro braços, Tabela 1, tendo sido incluída a contribuição desta dissertação.

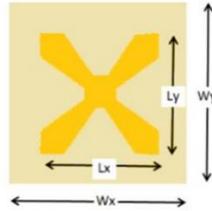


Figura 3 – Geometria estrela de quatro braços, [17].

Tabela 1 – Trabalhos utilizando a geometria estrela de quatro braços [30]

Ano	Título do Trabalho	Características	Referência
2013	<i>Four arms star: An useful geometry for switchable FSS</i>	A geometria apresentou uma redução considerável na primeira frequência de ressonância.	[26]
2014	Ajuste da Resposta em Frequência de FSS com Geometria Estrela de Quatro Braços.	Apresentou o ajuste da frequência de ressonância da FSS utilizando a geometria, destacando-se também fatos como miniaturização, polarização e operação multibanda.	[6]
2015	<i>Band Pass FSS with Slot Four Arms Star Geometry</i>	Foi investigada a dependência da frequência de ressonância com relação a largura dos braços da estrela tipo <i>slot</i>	[27]
2016	Superfície Seletiva em Frequência Ativa Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços	Foi utilizado como elemento de comutação o diodo PIN. Além da FSS ser de estrela de quatro braços do tipo fenda com borda.	[28]
2016	<i>Bandpass frequency selective surface using asymmetrical slot four arms star geometry</i>	O comprimento dos braços da estrela e a polarização afetam a resposta de frequência da FSS assimétrica tipo <i>slot</i> .	[29]
2017	<i>A Dual-band Frequency Selective Surface Using Four Arms Star Geometry Associated to Trapezoidal Rings for WiFi Applications</i>	FSS <i>dual-band</i> usando geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais para aplicações Wi-Fi.	[30]
2018	Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços para Aplicação em 2,4 GHz	RFSS desenvolvida para aplicação na faixa de 2400-2483,5 MHz, utilizando o diodo PIN	[31]
2019	<i>Varactor-Tunable Four Arms Star Bandstop FSS With a Very Simple Bias Circuit</i>	RFSS rejeita-faixa a partir da mudança do estado do varactor, com frequência de ressonância variando de 3,4 GHz a 3,8 GHz	[32]
2021	Superfícies seletivas em frequência continuamente reconfiguráveis associando as geometrias dipolos e estrela de quatro braços utilizando varactores.	FSS reconfigurável através da inserção de varactores, associando as geometrias dipolo e estrela de quatro braços. A inserção dos dipolos permite recuperar a ressonância suprimida pelas linhas de polarização dos varactores.	Este trabalho

A associação de diferentes geometrias possibilita o desenvolvimento de FSS nas quais

cada ressonância está associada à geometria correspondente. Inserindo em uma dessas geometrias um elemento ativo, a respectiva ressonância poderá ser variada, mantendo-se fixa a ressonância associada à outra geometria. Dessa forma, obtém-se para uma mesma FSS, uma resposta em frequência reconfigurável e uma resposta em frequência fixa, o que a torna bastante atrativa.

Portanto, a FSS reconfigurável investigada nesta dissertação é uma evolução das pesquisas realizadas no GTEMA-IFPB, sendo particularmente atrativa para aplicações em antenas inteligentes.

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, sendo no Capítulo 1 apresentada a Introdução. No Capítulo 2 apresenta-se uma fundamentação teórica na qual são abordados os conceitos, classificações e aplicações das FSS, como também a diferença entre FSS e FSS reconfigurável e o elemento ativo a ser utilizado para reconfiguração nesta dissertação. No Capítulo 3 é abordada a descrição do projeto, enfatizando as geometrias que são utilizadas, sendo elas dipolo e estrela de quatro braços, mostrando como dimensionar as geometrias estrela de quatro braços, o dipolo e a associação dessas geometrias, apresenta também o varactor utilizado nesta dissertação e suas principais características. No Capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais e numéricos desta dissertação. Por fim, no Capítulo 5 estão as considerações finais, enfatizando os resultados obtidos e sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este Capítulo é dividido em duas partes, sendo na primeira descritos os fundamentos das FSS e na segunda os princípios de funcionamento e modelos dos varactores.

2.1 FSS

As FSS, são basicamente arranjos periódicos que possuem a capacidade de operar como filtros, podendo refletir, deixar passar ou absorver ondas eletromagnéticas em determinadas faixas frequências. Embora as FSS possam ser tridimensionais, neste trabalho serão consideradas apenas as FSS planares, ou seja, quando uma de suas dimensões é muito menor que o comprimento de onda no espaço livre, correspondente à sua frequência de ressonância. Dentre outros fatores, a resposta em frequência da FSS depende da polarização da onda incidente, assim como do seu ângulo de incidência, da geometria do elemento básico do arranjo planar, da periodicidade dos elementos constituintes do arranjo e da permissividade e espessura do substrato, Figura 4.

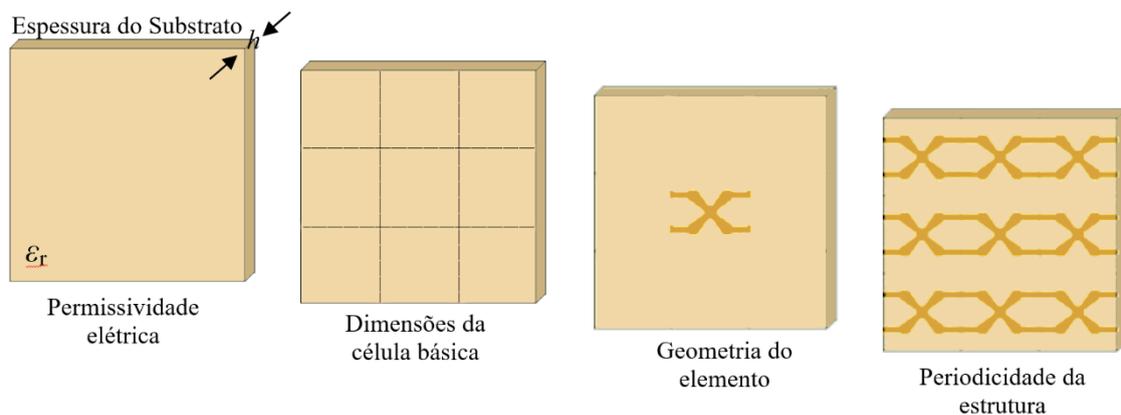


Figura 4 – Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS.

2.1.1 Classificações das FSS

De acordo com a literatura [12], as FSS podem ser classificadas de diversas formas. A seguir serão apresentadas algumas classificações.

2.1.1.1 Preenchimento da Célula

As FSS podem ser classificadas de acordo com o tipo do elemento básico do arranjo periódico, podendo ser do tipo *patch* condutor, ou abertura, *slot*. Dessa maneira, quando se trata da FSS do tipo *patch*, Figura 5, a célula unitária é composta por uma superfície dielétrica e o elemento básico é um *patch* metálico. Neste caso, a FSS atua como um circuito LC em série, apresentando o comportamento de um filtro rejeita-faixa. Quando a FSS entra em ressonância, ocorre a reflexão praticamente total da onda incidente, comportando-se assim como um condutor perfeito, [12].

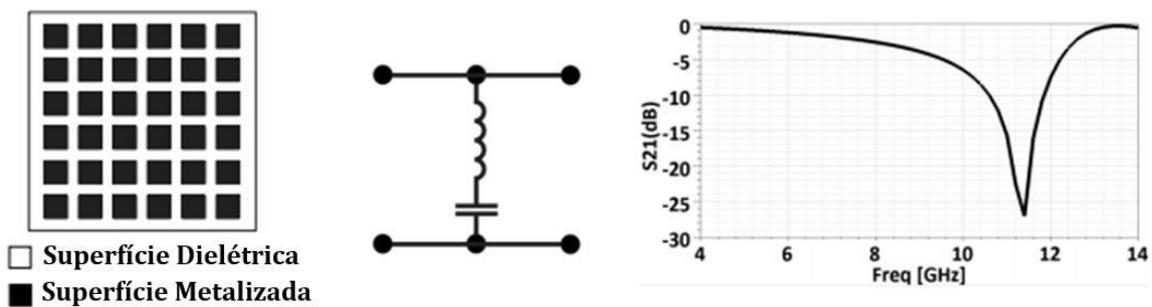


Figura 5– FSS do tipo patch,[33].

Para uma FSS do tipo abertura, *slot*, Figura 6, a FSS atua como um circuito LC em paralelo, apresentando um comportamento de filtro passa-faixa. Quando a FSS entra em ressonância, a estrutura se torna praticamente transparente para a onda incidente, resultando assim na transmissão da mesma, [12].

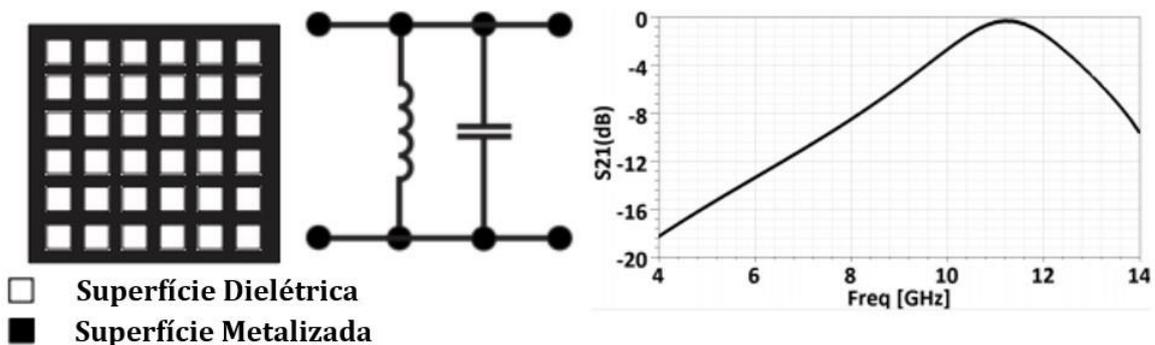


Figura 6 - FSS do tipo abertura, [33].

2.1.1.2 Geometria do elemento básico

Segundo [12], [13], a geometria do elemento básico da FSS pode ser classificada em quatro grandes grupos:

O grupo 1 abrange N-polos conectados pelo centro, Figura 7, sendo as estruturas mais comuns: dipolo fino, dipolos cruzados, tripolo e a cruz de Jerusalém.

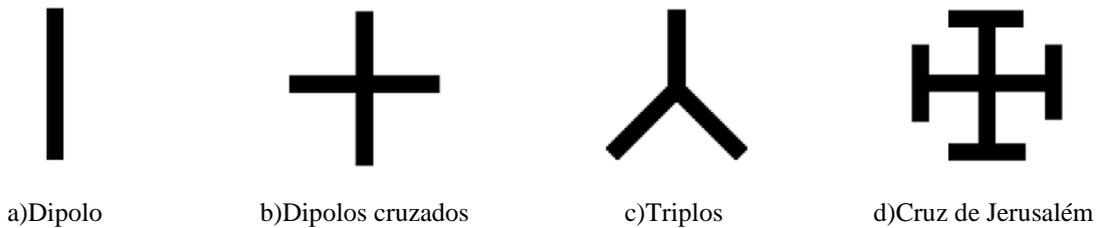


Figura 7 – Elementos do grupo 1, [12].

O grupo 2 é composto pelos elementos do tipo espira, Figura 8, podendo ser citados como exemplos: espira quadrada, espira quadrada dupla, espira quadrada com grade, anéis circulares.

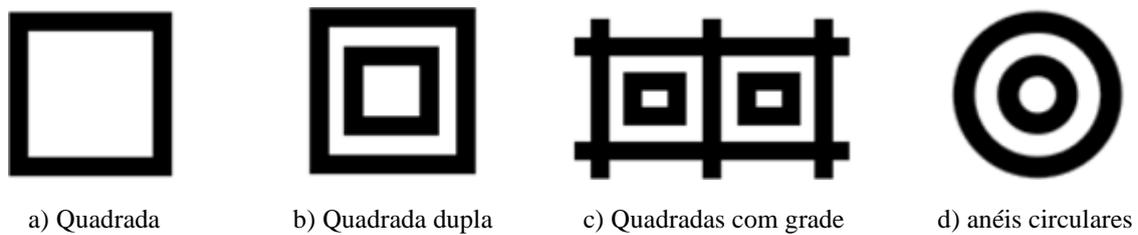


Figura 8 - Elementos do grupo 2, [12].

O grupo 3 inclui os elementos com o interior sólido, Figura 9, citando-se como exemplos os *patches* quadrados, retangulares, hexagonais e circulares.

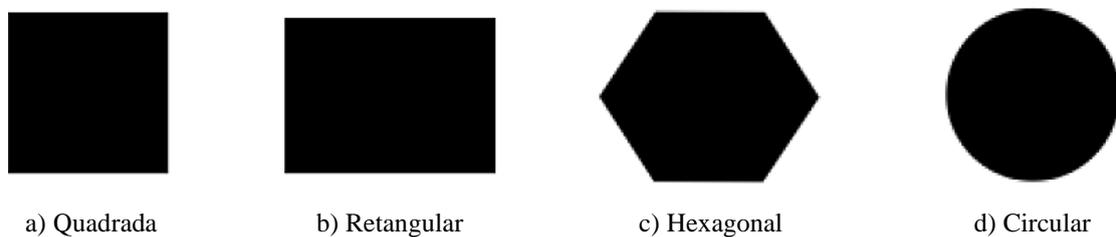


Figura 9 - Elementos do grupo 3, [12].

O grupo 4 inclui os elementos que são compostos por combinações de elementos dos grupos 1, 2 e 3, Figura 10.

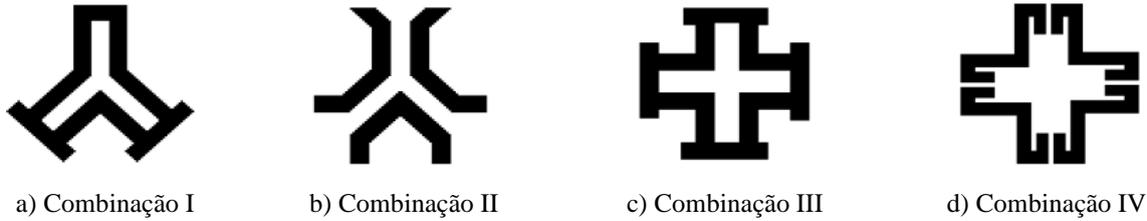


Figura 10 - Elementos do grupo 4, [12].

Além dos 4 grupos citados, propõe-se a inclusão de um grupo 5, formado pelos elementos fractais, tendo como exemplos:

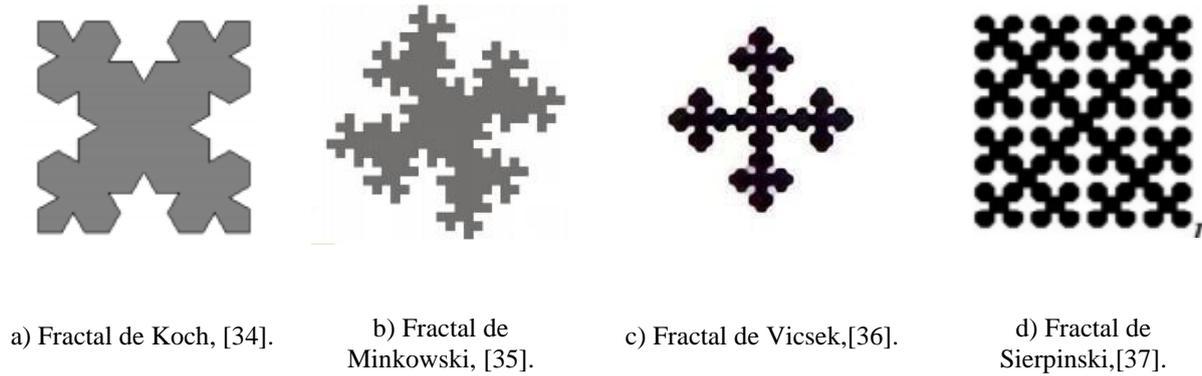


Figura 11 - Elementos do grupo 5.

Entretanto, as geometrias não se encerram nos cinco grupos citados. No Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado do Instituto Federal da Paraíba (GTEMA-IFPB), vêm sendo desenvolvidas novas geometrias, citando-se, por exemplo, a estrela de quatro braços, Figura 12, [21], [23], [24] e a matrioska, Figura 13, [22], [38].



Figura 12 – Geometria estrela de quatro braços.



(a) Matrioska original, [38], [39].

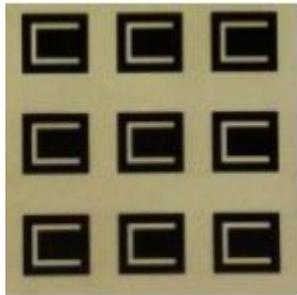


(b) Matrioska independente da polarização, [40], [41].

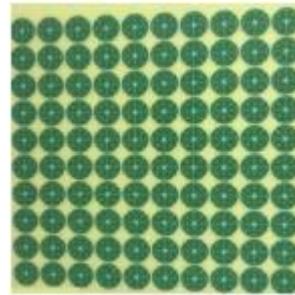
Figura 13 – Geometria matrioska.

2.1.1.3 Passiva e reconfiguráveis

As FSS também podem ser classificadas em FSS passivas e FSS reconfiguráveis. As FSS passivas são projetadas para manter sua resposta em frequência fixa, tendo como vantagens, entre outras, o processo de fabricação e a simplicidade de projeto [12], [13], Figura 14. As FFS reconfiguráveis têm a capacidade de ajustar, ou seja, reconfigurar a sua resposta em frequência.



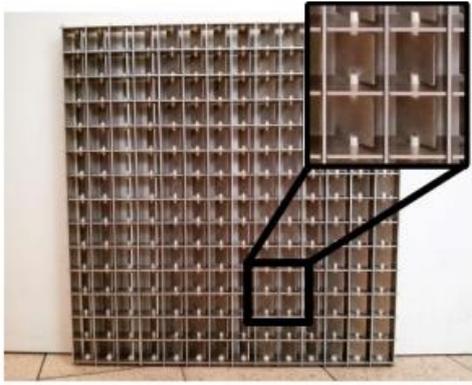
a) FSS passiva com geometria em forma de U, [33].



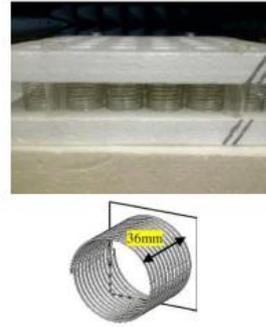
b) FSS passiva com geometria Matrioska circular, [41].

Figura 14 – Exemplos de FSS Passiva

A reconfiguração da FSS pode ser obtida através de alterações nas características do seu substrato [9], [42], [43], da modificação mecânica da geometria [18], [44], [45], Figura 15, ou pela inserção de elementos ativos (diodos PIN, varactores, chaves MEMS) que modificam eletronicamente a geometria equivalente da FSS, Figura 16, [23], [44], [46] – [48].

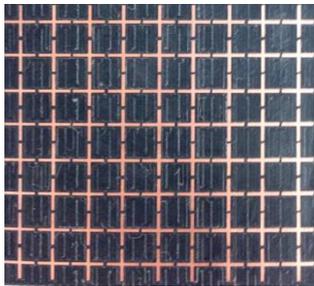


a) FSS reconfigurável mecanicamente, [45].

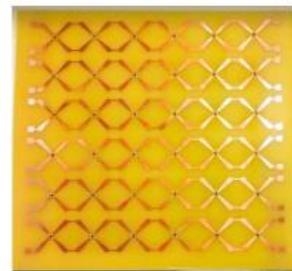


b) FSS usando ressonador de mola, [18].

Figura 15 – Exemplos de FSS's reconfigurável



a) FSS reconfigurável usando diodo PIN, [47].



b) FSS reconfigurável com geometria estrela de quatro braços usando diodo PIN, [23].

Figura 16 – FSS's eletronicamente reconfigurável.

Nesta dissertação serão consideradas as FSS reconfiguráveis eletronicamente, usando como elementos ativos os varactores.

2.1.1.4 Espessura da camada de metalização

As FSS podem ser classificadas de acordo com a espessura da camada de metalização t , podendo ser de anteparo fino, que são as que apresentam uma camada de metalização com espessura menor que $0,001\lambda_0$, em que λ_0 corresponde ao comprimento de onda para a frequência de ressonância da FSS, Figura 17, tendo como vantagens o baixo custo de produção e a facilidade de projeto.

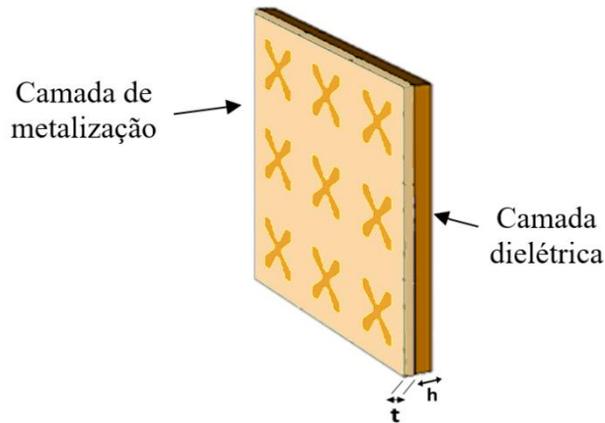


Figura 17 – Ilustração de FSS de anteparo fino [23].

As FSS de anteparo espesso apresentam uma camada de metalização com espessura muito maior que $0,001\lambda_0$, Figura 18. Uma das suas principais vantagens é a transição mais rápida da banda passante para a banda de rejeição, *roll-off*. Por outro lado, entre suas desvantagens podem ser citadas o custo de produção e a complexidade de projeto.

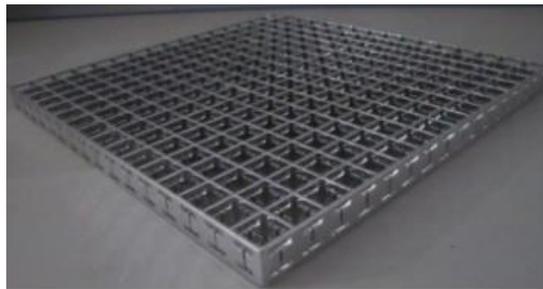


Figura 18 – FSS de anteparo espesso, [49].

2.1.2 Aplicações

As FSS têm diversas aplicações as quais ocupam diferentes faixas no espectro eletromagnético. Dentre muitas aplicações, pode-se citar os radomes, absorvedores de micro-ondas, blindagens eletromagnéticas, entre outros. Porém, uma das aplicações mais comum é encontrada na porta do forno de micro-ondas doméstico, como ilustrado na Figura 19, em que a FSS deixa passar apenas a luz visível, enquanto reflete as ondas produzidas pelo forno, que funciona na faixa de frequência em torno de 2,45 GHz. Dessa forma, é possível observar o alimento no interior do forno de micro-ondas.



Figura 19 - FSS utilizada como anteparo na porta do forno de micro-ondas, [33].

A antena de banda dupla também é outra aplicação das FSS, Figura 20, na qual a FSS é utilizada como um sub-refletor, que rejeita a frequência de operação do alimentador 2 (*feeder 2*), sendo transparente para a frequência de operação do alimentador 1 (*feeder 1*). Logo, com apenas um único refletor é possível operar em duas frequências distintas, [9], [12], [13], [50].

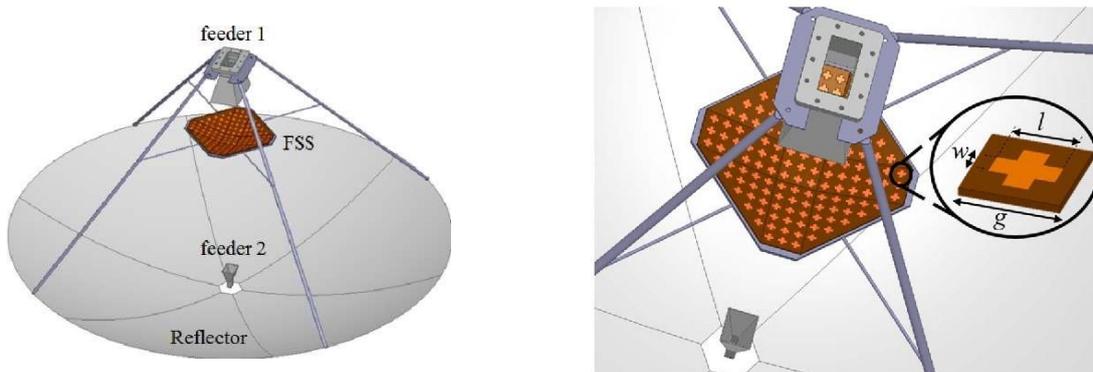


Figura 20 - Antena de banda dupla com sub-refletor usando FSS, [50].

As FSS também são aplicadas em aeronaves e navios, em forma de radomes das antenas de radar ou comunicação, nos quais opera como uma FSS com resposta em frequência do tipo passa-faixa [9], permitindo a passagem da frequência de operação e bloqueando, ou minimizando, as demais frequências, evitando-se assim interferências, Figura 21.

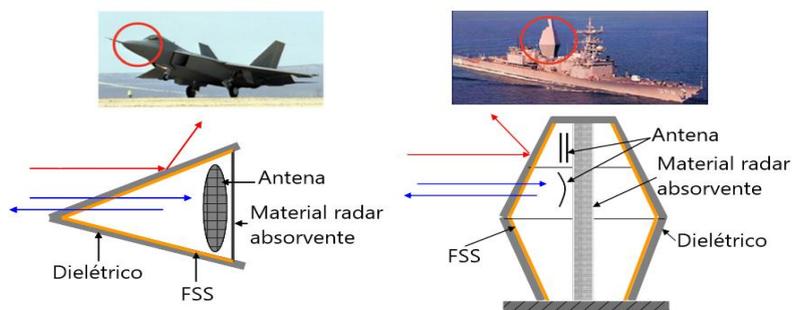


Figura 21 – Exemplos de FSS como radomes, [9], [51].

Outro exemplo de aplicações das FSS é na área da segurança de redes sem fio em ambientes *indoor*, restringindo o acesso não autorizado às informações integrada na rede [52].

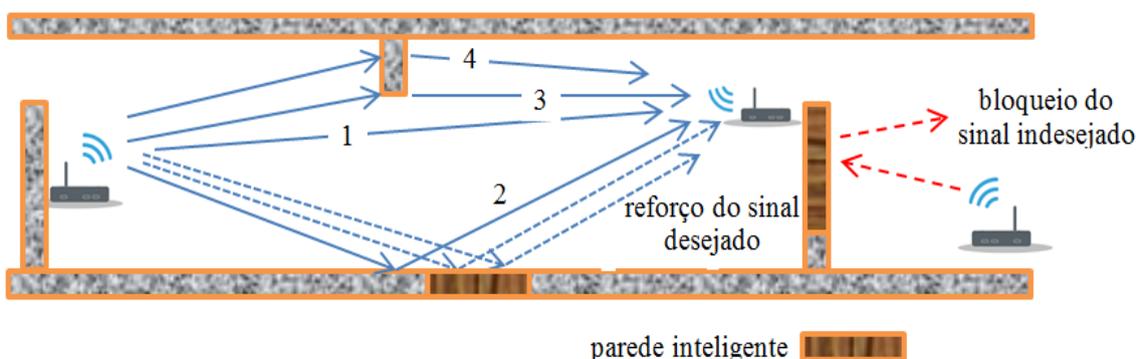


Figura 22 – Paredes inteligentes para melhoria da comunicação sem fio *indoor*, [52].

As FSS também podem ser utilizadas em sistemas de RFID sem *chip*, conhecidos também como *chipless*, que apresentam baixo custo em relação aos sistemas que possuem *chip* [53]. O funcionamento de uma etiqueta RFID sem chip está apresentado na Figura 23, onde o leitor envia para a etiqueta uma onda com frequências predefinidas e através da reflexão e transmissão da etiqueta, a resposta é gerada.

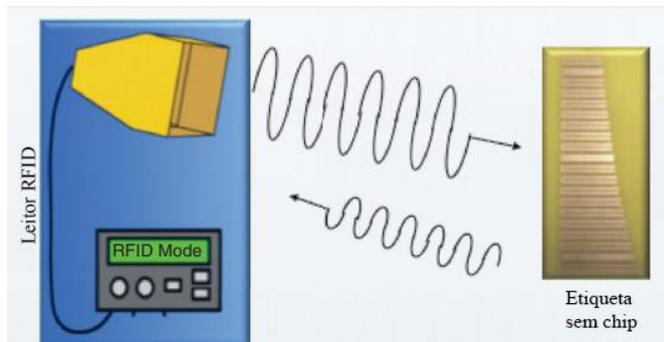


Figura 23 – Sistema RFID com etiqueta e sem chip inspirada em FSS, [53].

2.1.3 Técnicas de caracterização

O projeto de uma FSS envolve geralmente três etapas: projeto inicial, caracterização numérica e caracterização experimental. O projeto inicial é feito a partir de equações iniciais de projeto, que apresentam um resultado aproximado, com uma maior ou menor precisão, dependendo da geometria e das equações utilizadas. A FSS obtida a partir do projeto inicial é caracterizada numericamente, e verifica-se se as características desejadas foram alcançadas ou não. Caso não tenham sido alcançadas, o projeto é otimizado numericamente até que sejam

alcançadas as características desejadas. Então, a FSS é fabricada e caracterizada experimentalmente, comparando-se os resultados obtidos, com os desejados. Caso as características desejadas não tenham sido alcançadas, é feita uma análise dos resultados retorna-se à otimização numérica. A seguir são apresentadas algumas dessas técnicas.

2.1.3.1 Caracterização Numérica

Existem diversas técnicas utilizadas para analisar as FSS. Inicialmente foram desenvolvidas fórmulas simples e aproximadas com as quais se tornou possível a determinação das características de transmissão e de reflexão para as FSS tipo *patches* condutores ou aberturas retangulares, sendo que essas fórmulas possuem limitações, podendo apresentar resultados imprecisos, principalmente para geometrias mais complexas e ressonâncias de ordem superior [13].

O método do circuito equivalente é um dos métodos utilizado para se obter a caracterização numérica. Utiliza-se um circuito LC que representa a resposta em frequência da FSS, Figura 28. Porém, não é indicado utilizar esse método para geometrias mais complexas ou para modos de ordem superior [13], [33].

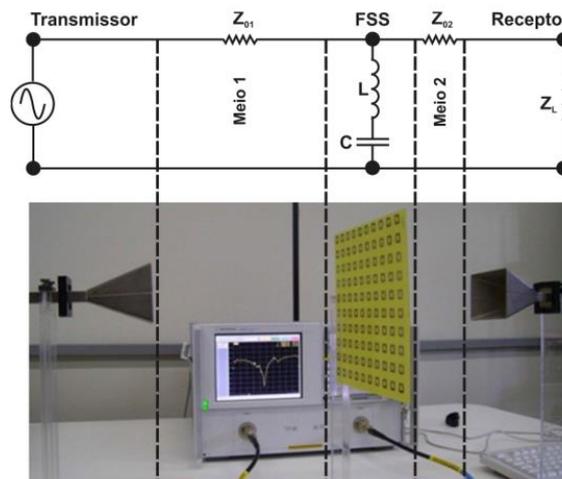


Figura 24 – Modelo de circuito equivalente, [33].

Com a maior disponibilidade de recursos computacionais, diversos métodos numéricos passaram a ser viáveis. Entre esses métodos, podem ser citados: o Método dos Momentos (*Method of Moments* – MoM) [54], o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Difference Time Domain* – FDTD) [55], o Método dos Elementos Finitos (*Finite-Element Method* – FEM) [56], Método Iterativo das Ondas (*Wave Concept iterative procedure* – WCIP) [57, [58], dentre outros.

Com o avanço da tecnologia, programas computacionais comerciais passaram a ser disponibilizado, podendo ser utilizados para se obter a caracterização numérica das FSS, com resultados precisos e confiáveis. Neste trabalho, utilizou-se o *software* comercial ANSYS Electronics Desktop, que inclui, entre outros, os programas computacionais Designer e HFSS.

2.1.3.2 Caracterização Experimental

Após realizada a caracterização numérica, as FSS são fabricadas para que possam ser validadas com a caracterização experimental. Uma das técnicas mais utilizadas é o sistema de medição que utiliza duas antenas cornetas como componentes de transmissão e recepção, conectadas a um analisador de redes, e a FSS entre elas, Figura 29. A onda eletromagnética emitida a partir da antena transmissora incide na FSS, que reflete ou deixa passar parte da potência incidente, sendo essa captada pela antena receptora. Assim, por meio do analisador de redes, é possível caracterizar a resposta em frequência da FSS, [12], [13], [41].

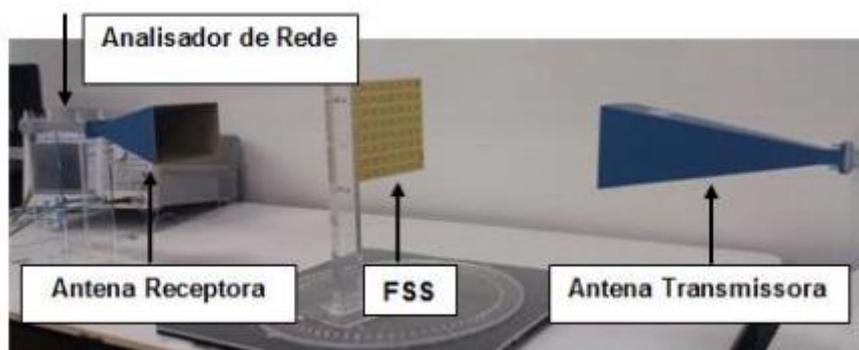


Figura 25 – *Setup* de medição de FSS com antenas cornetas, [41].

Para a obtenção de resultados mais precisos, outro procedimento que pode ser utilizado para a medição, é a utilização das antenas cornetas associadas a lentes, Figura 30. Nesse método, a difração nas bordas da FSS é reduzida significativamente, pois as lentes ajudam a focar a onda no centro da FSS, [59].

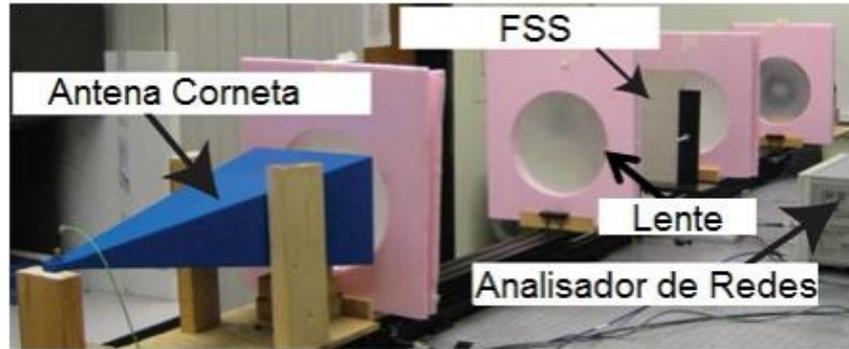


Figura 26 – *Setup* de medição de FSS com antenas cornetas associadas a lentes, [59].

A medição em câmaras anecóicas, onde são utilizados painéis absorvedores, Figura 31, garantem um ambiente praticamente livre de interferências, [60]. Entretanto, em função do elevado custo, as câmaras anecóicas não são facilmente disponíveis.

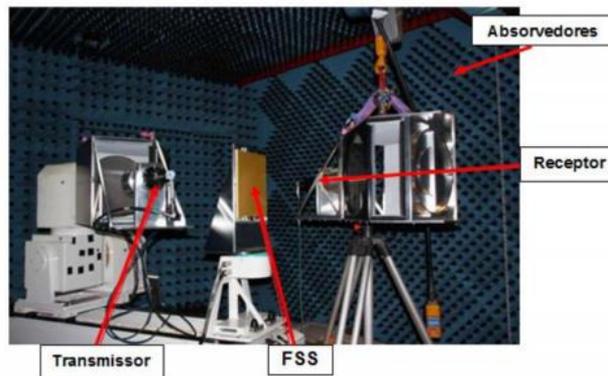


Figura 27 – Câmera anecóica, [60].

Um procedimento para inimizá o efeito da difração nas bordas da FSS, é a utilização de uma janela de medição, que tanto pode ter absorvedores, Figura 32, ou não, Figura 33. Como a onda que alcança a antena receptora é praticamente a que passa através da FSS, obtém-se bons resultados com esse procedimento, sendo este o procedimento adotado nesta dissertação.



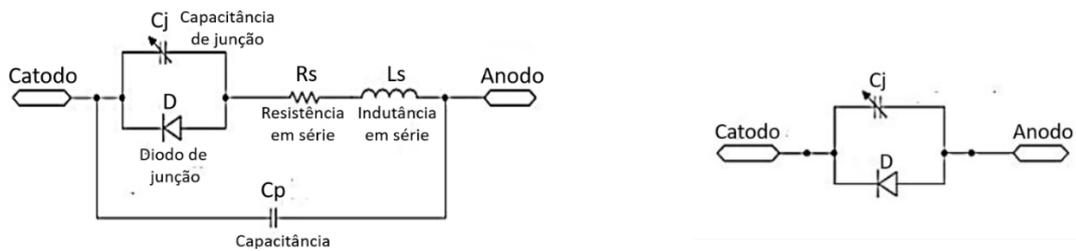
Figura 28 – Janela de medição com absorvedores.



Figura 29 – Janela de medição sem absorvedores.

2.2 DIODOS VARACTORES

Os varactores são diodos de junção PN, em que o anodo é altamente dopado e separado do catodo através de uma camada de depleção, que funciona como um isolante praticamente perfeito, resultando em um capacitor de placas paralelas, no qual pode-se controlar a capacitância através da tensão de polarização reversa [32], [61]. Um modelo mais preciso do varactor é composto por capacitâncias, indutâncias e resistências, porém, em muitas aplicações, é utilizado um modelo mais simples, no qual se considera apenas a capacitância variável. Na Figura 24, são apresentados dois modelos do varactor.



(a) - Modelo de diodo varactor, [62].

(b) - Modelo do varactor simplificado, [62].

Figura 30 – Modelos do varactor

Nesta dissertação será utilizado o modelo simplificado do varactor. É considerado o varactor SMV1231, com encapsulamento SC79, fabricados pela Skyworks Solutions, Inc. [62], Figura 25. A Figura 26 apresenta as dimensões do encapsulamento do varactor citado anteriormente.



Figura 31 – Encapsulamento do varactores SMV1231, [62].

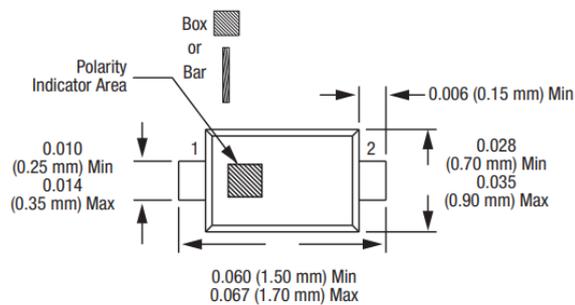


Figura 32 – Dimensões do Encapsulamento SC79, [62].

A Figura 27 apresenta a curva da capacitância em função da tensão reversa, para o varactor SMV1231.

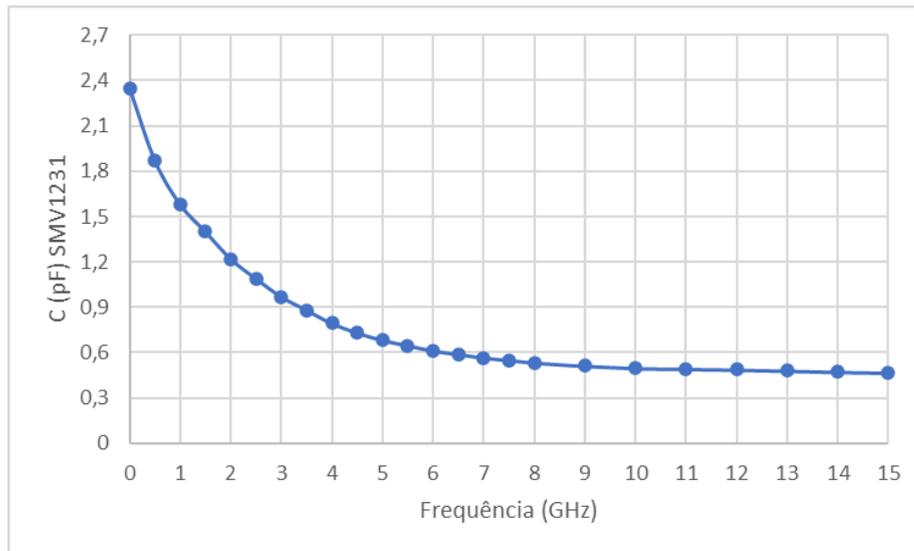


Figura 33 - Capacitância x Tensão reversa, [62].

CAPÍTULO 3

3. DESCRIÇÃO DO PROJETO

Este Capítulo apresenta a descrição do projeto das geometrias que são utilizadas nesta dissertação, o dipolo e a estrela de quatro braços. A resposta em frequência é analisada separadamente para cada geometria. Em seguida, a resposta em frequência das geometrias associadas é analisada e, por fim, inserindo o elemento ativo, que no caso deste trabalho é um varactor.

Nesta dissertação utiliza-se a associação das geometrias estrela de quatro braços e dipolo. A geometria estrela de quatro braços foi escolhida em função das suas características, em especial, a sua boa resposta quando utilizada com FSS reconfiguráveis [24], [26], [63], [64]. Como será descrito neste Capítulo, as linhas de alimentação dos varactores suprimem a ressonância na polarização x . Para recuperar essa ressonância, são inseridos dipolos ao longo da direção x , de maneira que a FSS apresenta uma resposta em frequência fixa, associada à geometria dipolo, e uma resposta em frequência variável.

3.1. GEOMETRIA DIPOLO

A geometria dipolo, Figura 34, é uma das geometrias mais simples, ocorrendo sua frequência de ressonância quando o seu comprimento (L) é próximo da metade do comprimento de onda guiado (λ_g), $L \cong \lambda_g/2$. Entretanto, essa ressonância só ocorre se o dipolo estiver na mesma direção do campo elétrico [12], [38].

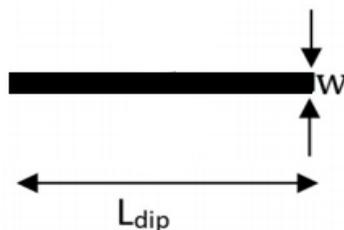


Figura 34 – Geometria dipolo.

As dimensões do dipolo podem ser determinadas utilizando a equação (1) a seguir:

$$L_{dip} = \frac{3 \times 10^8}{2f_{res}\sqrt{\epsilon_{ref-dip}}} \quad (1)$$

Onde f_{res} corresponde a frequência de ressonância desejada e $\epsilon_{ref-dip}$ é dado por:

$$\epsilon_{ref-dip} = \frac{\epsilon_{ref-CPW} + \epsilon_{ref-MS}}{2} \quad (2)$$

Sendo que:

$\epsilon_{ref-CPW}$ é a constante dielétrica efetiva de um guia de ondas coplanar (CPW) sem o plano terra, no qual a largura da fita central é igual a largura do dipolo (w) e o espaçamento entre a fita central e os planos coplanares é de $10h$.

ϵ_{ref-MS} é a constante dielétrica efetiva da microfita, considerando a largura da fita igual a largura do dipolo (w), para um substrato dielétrico de mesma constante dielétrica (ϵ_r) e espessura (h).

Os valores de $\epsilon_{ref-CPW}$ e ϵ_{ref-MS} podem ser obtidos usando aplicativos como o AppCAD, [66].

Na Figura 35 é apresentada uma resposta em frequência típica do dipolo. Observa-se que a ressonância aparece apenas quando o campo elétrico esta na mesma direção do dipolo, que neste caso na direção x .

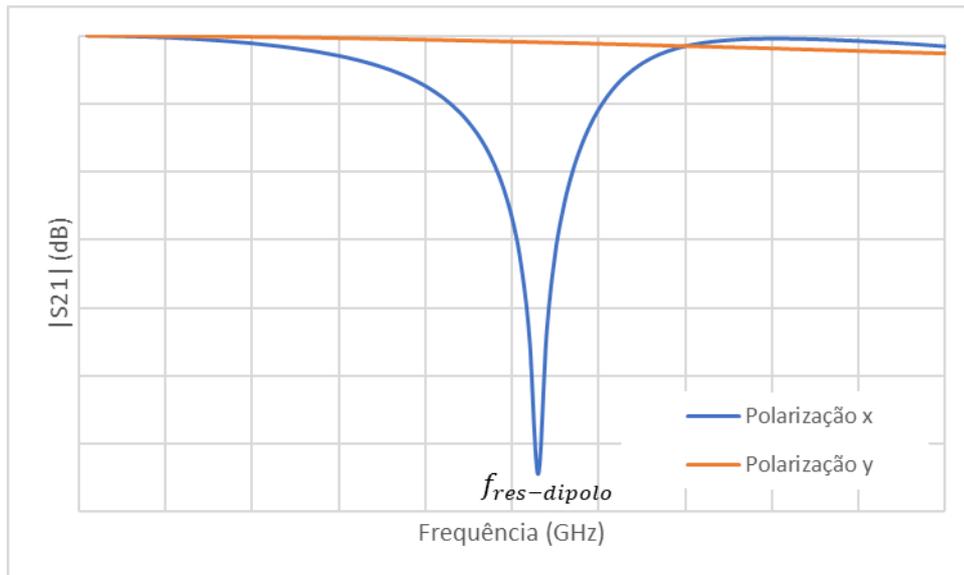
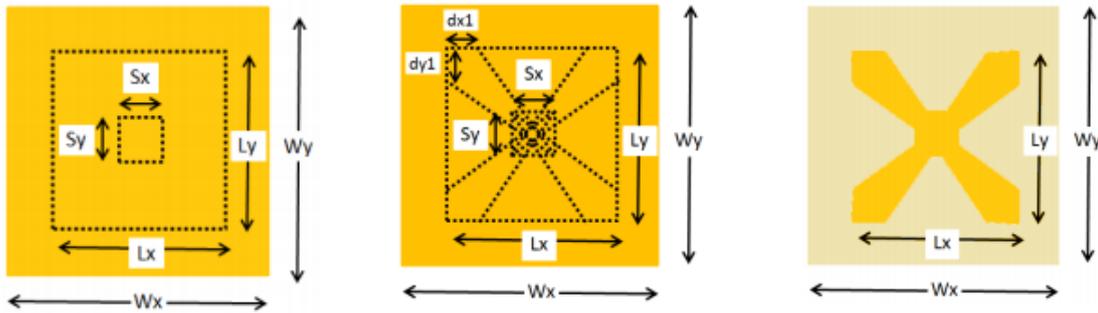


Figura 35 – Resposta em frequência do dipolo.

3.2 OBTENÇÃO DA GEOMETRIA ESTRELA DE QUATRO BRAÇOS

Para este trabalho foi escolhida a geometria estrela de quatro braços simétrica do tipo *patch* condutor, [20]. Pode-se obter essa geometria a partir de um *patch* retangular de dimensões L_x e L_y , colocado em uma célula unitária cujas dimensões são W_x e W_y . No centro do *patch* é colocada uma região de comutação com dimensões S_x e S_y , Figura 36 (a). As dimensões dos braços da estrela são definidas pelas dimensões do *patch*, ou seja, L_x e L_y , e por d_{x1} e d_{y1} , como ilustrado na Figura 36 (b). Em seguida, são traçadas diagonais das extremidades do *patch* até o canto oposto da região de comutação, Figura 36 (b). A camada metálica em que não faz parte da estrela de quatro braços é retirada, assim dando origem a geometria de estrela de quatro braços, Figura 36 (c).



- a) Célula unitária com retangular *patch* e área de comutação. b) Linhas das extremidades até o ponto de comutação. c) Geometria estrela de quatro braços.

Figura 36 – Passos para a obtenção da geometria estrela de quatro braços, [20].

A frequência de ressonância da geometria estrela de quatro braços pode ser determinada a partir da equação (3) com uma boa aproximação, principalmente quando $h \ll \lambda_0$, [38], [43]. A partir dos valores iniciais obtidos é realizado um processo de otimização numérica até que se alcance a resposta em frequência desejada.

$$f_{res}(GHz) = \frac{0,3}{2L_{efe}} \quad (3)$$

Sendo, $L_{efe} = L_x + L_y$.

Na Figura 37, é apresentada uma resposta em frequência típica correspondente à estrela de quatro braços, percebendo-se que a geometria é independente da polarização, apresentando as mesmas respostas em frequência para as polarizações x e y .

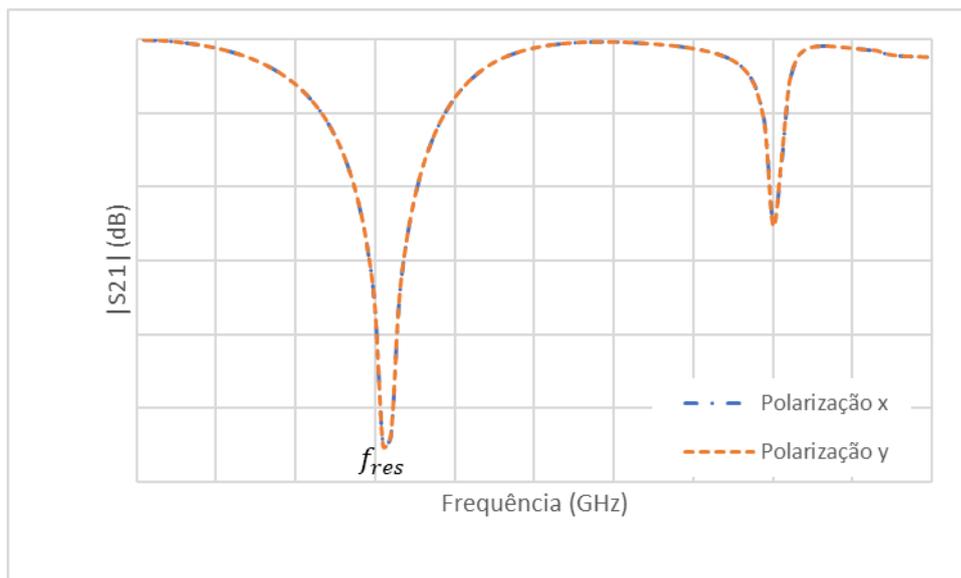


Figura 37 – Resposta em frequência da estrela de quatro braços.

Na região de comutação é inserida uma fenda, separando os braços superiores dos inferiores, possibilitando a inserção do elemento ativo, no caso o varactor, obtendo-se a FSS reconfigurável, Figura 38.

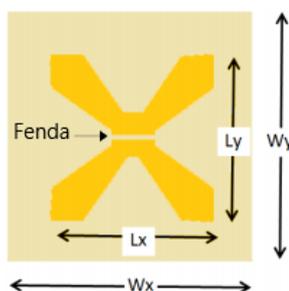


Figura 38 – Geometria estrela de quatro braços com fenda para a inserção do elemento de comutação, [24].

Na Figura 39, é apresentada a resposta em frequência da estrela de quatro braços com a fenda (*gap*). Percebe-se que, praticamente, apenas a polarização y é afetada.

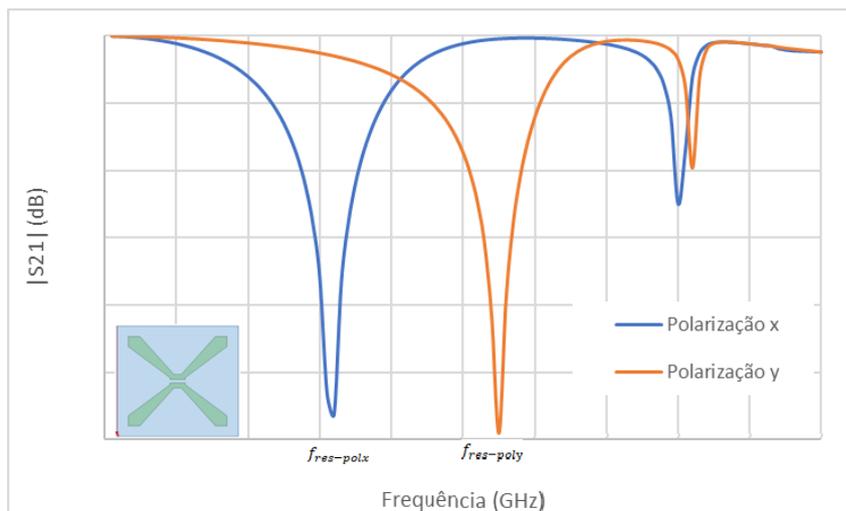


Figura 39 – Resposta em frequência da estrela de quatro braços com fenda.

São introduzidas linhas em cada borda dos braços da estrela, que servem para polarizar os varactores, Figura 40. A inserção dessas linhas altera a resposta em frequência da FSS, Figura 41, o que será discutido nos resultados preliminares.

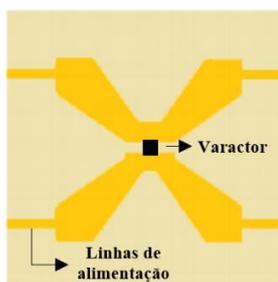


Figura 40 – Linhas de alimentação adicionadas, [24].

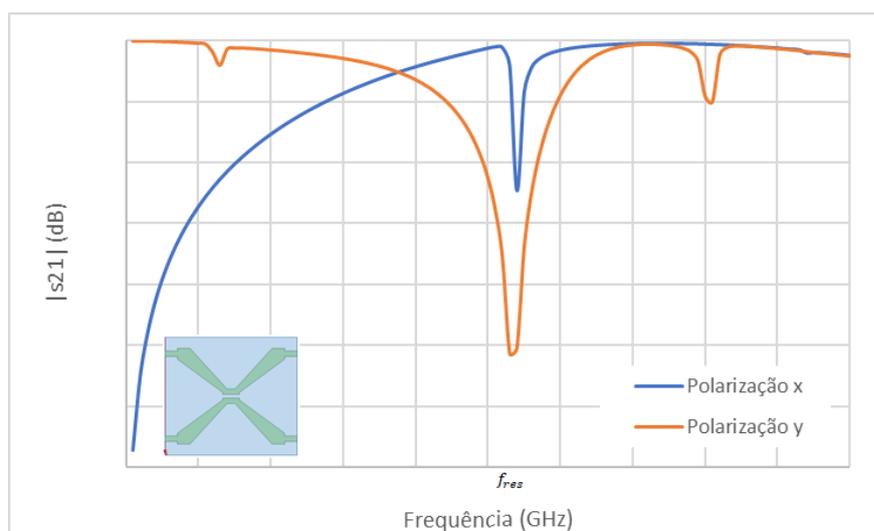


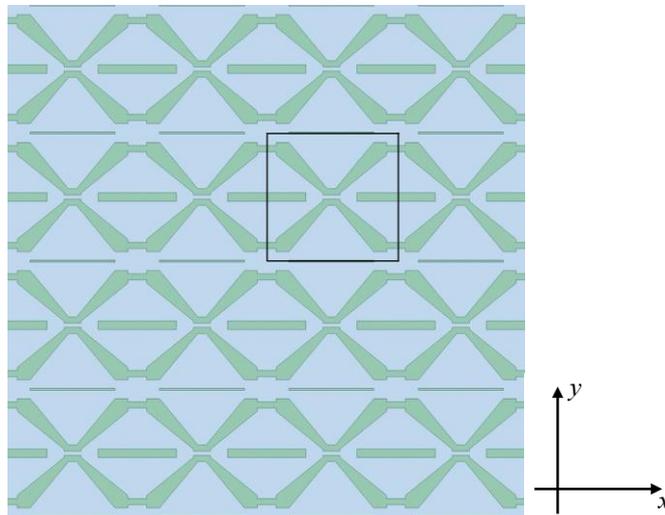
Figura 41 – Resposta em frequência da geometria estrela de quatro braços com linhas de alimentação.

Ao inserir as linhas polarização dos varactores, pode-se perceber que a ressonância na

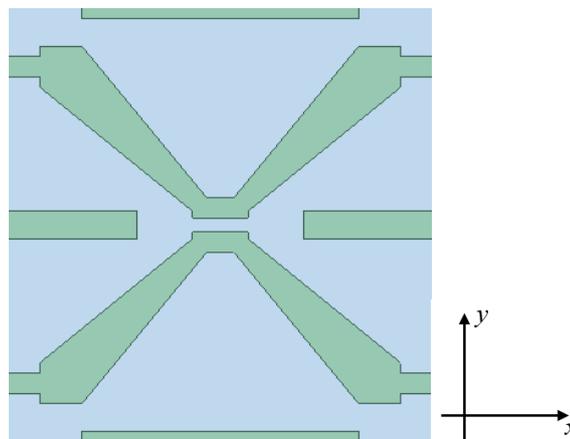
polarização x fica limitada (tanto em largura de banda como em intensidade). A inserção do dipolo tem como um dos objetivos, recuperar essa ressonância, como será apresentado na próxima seção.

3.3 ASSOCIAÇÃO DAS GEOMETRIAS DIPOLO E ESTRELA DE QUATRO BRAÇOS

Associando as geometrias dipolo e estrela de quatro braços obtém-se a geometria apresentada na Figura 42. Para essa geometria a resposta em frequência típica para as polarizações x e y são apresentadas nas Figuras 43 e 44, respectivamente.



(a) – FSS indicando a célula unitária.



(b) – Célula unitária com geometrias associadas.

Figura 42 – FSS e destaque da célula unitária

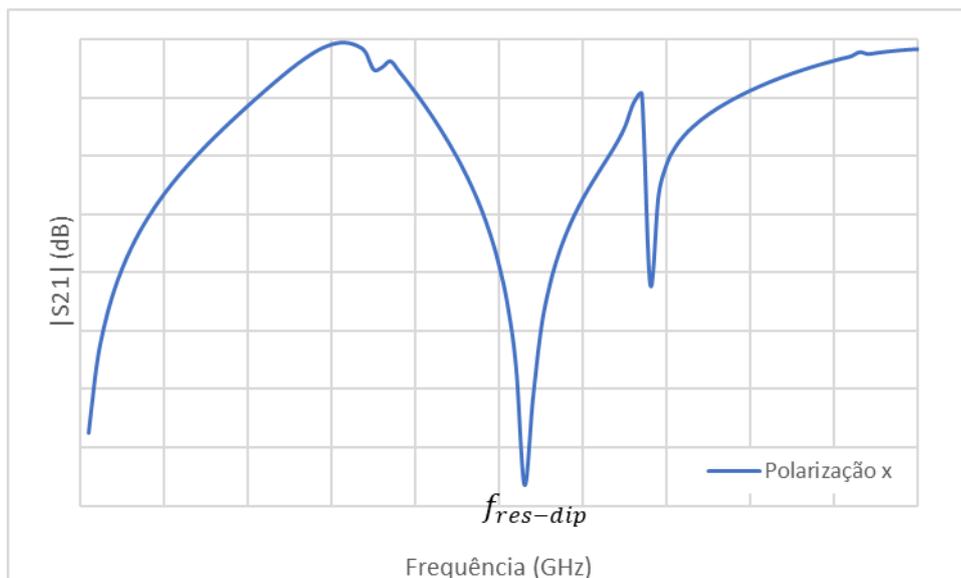


Figura 43 – Resposta em Frequência na polarização x .

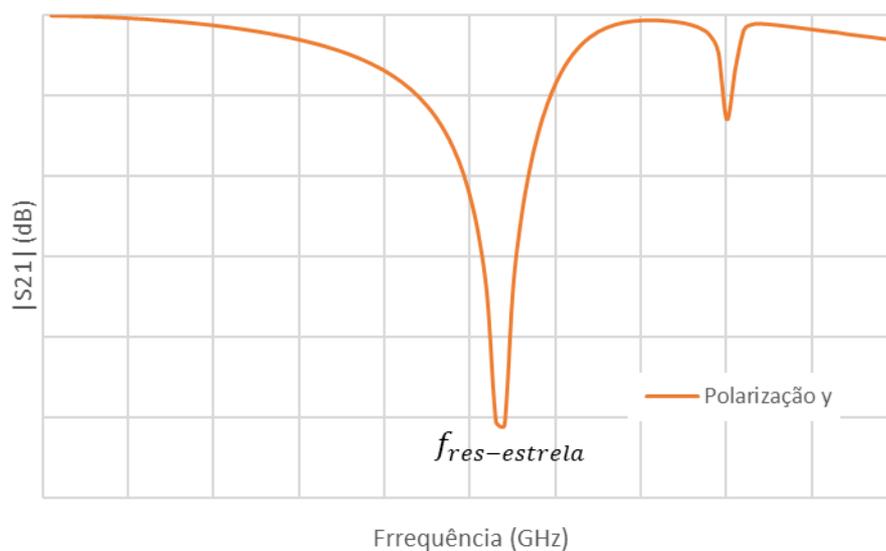


Figura 44 – Resposta em Frequência na polarização y

Pode-se perceber, que a polarização y praticamente não foi alterada. Já a polarização x passou a ter uma nova ressonância. Com a inserção do varactor na geometria utilizada, a ressonância que vai sofrer alteração é a frequência de ressonância da estrela de quatro braços.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Neste Capítulo são apresentados os resultados numéricos e experimentais, resposta em frequência da FSS, sendo inicialmente analisada cada geometria separadamente. Em seguida, são analisadas as geometrias associadas, e por fim, são analisadas as respostas em frequências das geometrias associadas e com a inserção do elemento ativo, o varactor SMV1231.

4.1 RESULTADOS NUMÉRICOS

Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o software de simulação comercial ANSYS HFSS. Na caracterização numérica da FSS é considerado o substrato de baixo custo FR4, com espessura $h = 1,2mm$, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas 0,02. As dimensões da célula unitária são as seguintes: $W_x = W_y = 32mm$. A estrela de quatro braços apresenta as seguintes dimensões: $L_x = L_y = 26mm$, $S_x = S_y = 4mm$, $d_x = d_y = 3mm$, $ms_x = ms_y = g = 1mm$. O dipolo apresenta como dimensões $L_{dip} = 20mm$ e $W_{dip} = 2mm$. Observe-se que pela periodicidade da FSS, na célula unitária o dipolo superior e inferior corresponde à metade da largura do dipolo e o dipolo central, corresponde à metade do comprimento dipolo, Figura 45. Caso não especificado, a incidência da onda eletromagnética é considerada normal à FSS.

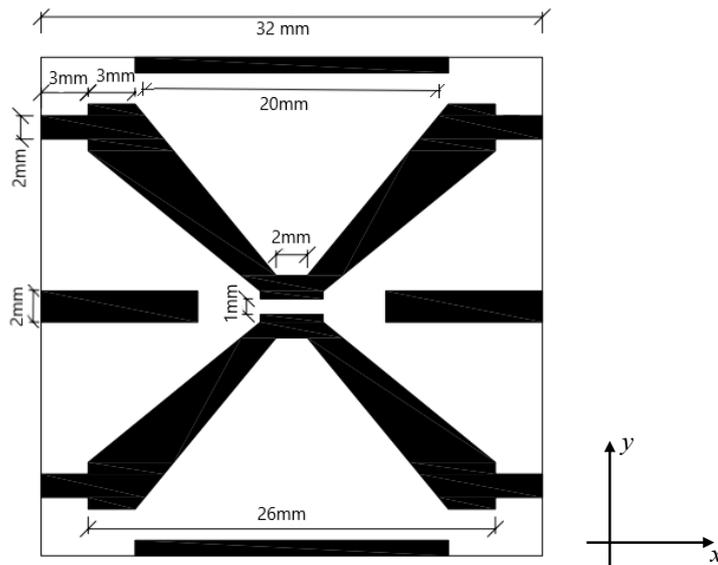


Figura 45 – Dimensões da geometria proposta.

Para uma melhor visualização, é apresentada na Figura 46 a FSS com 6×6 células unitárias.

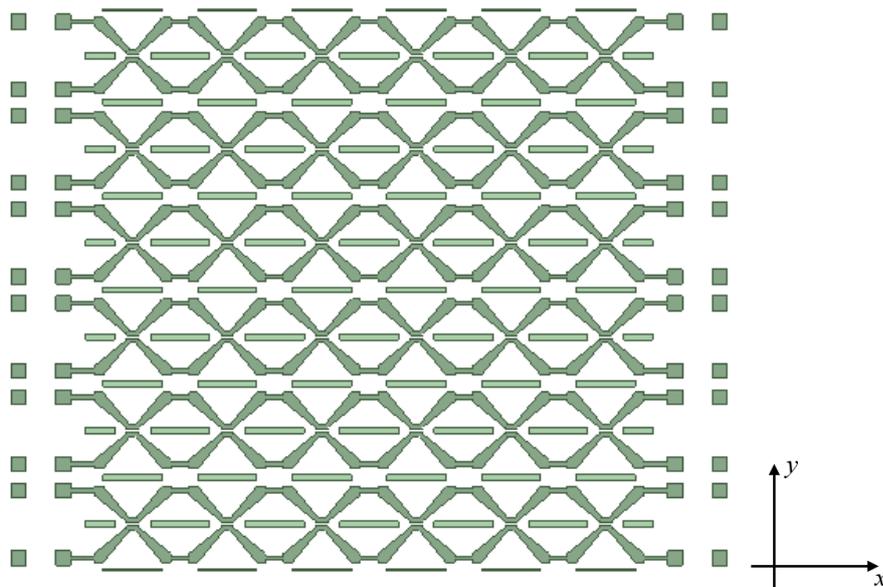


Figura 46 – FSS com geometrias associadas.

4.1.1 Polarizações x e y

Em um primeiro passo, a estrutura de estrela de quatro braços foi simulada em sua forma simples, sem o *gap*, sem as linhas de alimentação, apresentando como esperado, a mesma resposta em frequência para as polarizações x e y , com uma frequência de ressonância, em aproximadamente 3,1 GHz nas polarizações x e y , Figura 47. Quando comparado ao valor da frequência de ressonância calculado a partir de (3), 2,88 GHz, observa-se uma diferença de

7,09%, o que é uma boa aproximação para uma posterior otimização numérica.

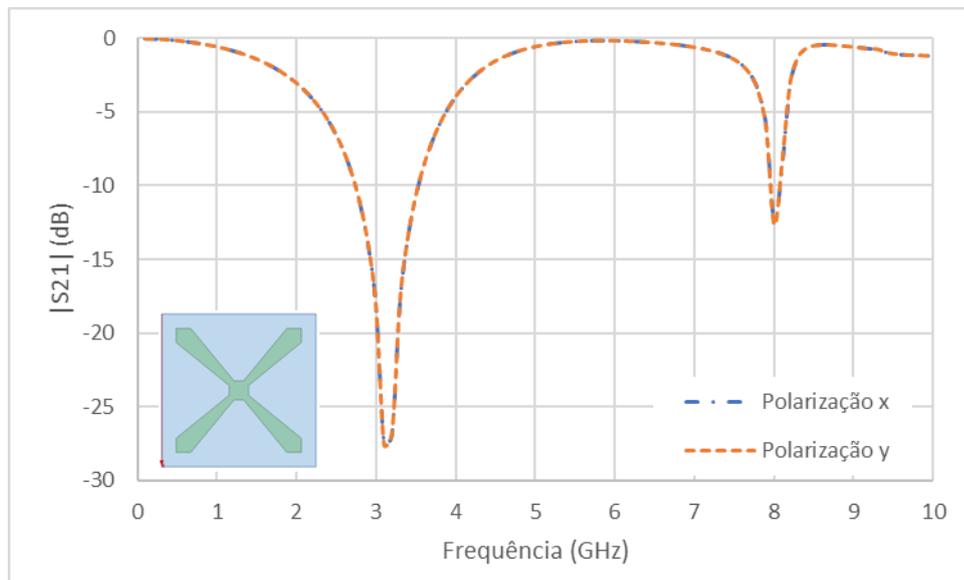


Figura 47 – Resposta em frequência, estrela de quatro braços.

Após, foi adicionado o *gap*, praticamente afetando apenas a polarização *y*, que passou a ter uma frequência de ressonância de aproximadamente 5,5 GHz, Figura 48. Já para a polarização *x*, a frequência de ressonância de 3,1 GHz permaneceu praticamente inalterada.

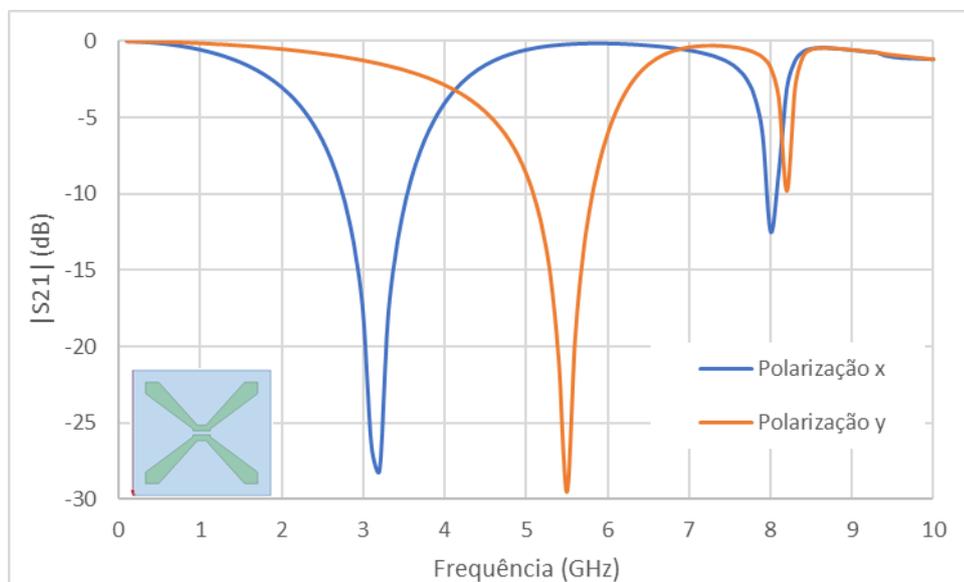


Figura 48 – Resposta em frequência, estrela de quatro braços com *gap*.

Posteriormente, adicionou-se as linhas de alimentação, observando-se uma pequena variação da frequência de ressonância para a polarização *y*, passando a frequência de

ressonância para 5,3 GHz. Por outro lado, para a polarização x , a FSS passa a ter uma resposta em frequência do tipo passa-faixa, com uma ressonância de pequena intensidade em 5,4 GHz, Figura 49.

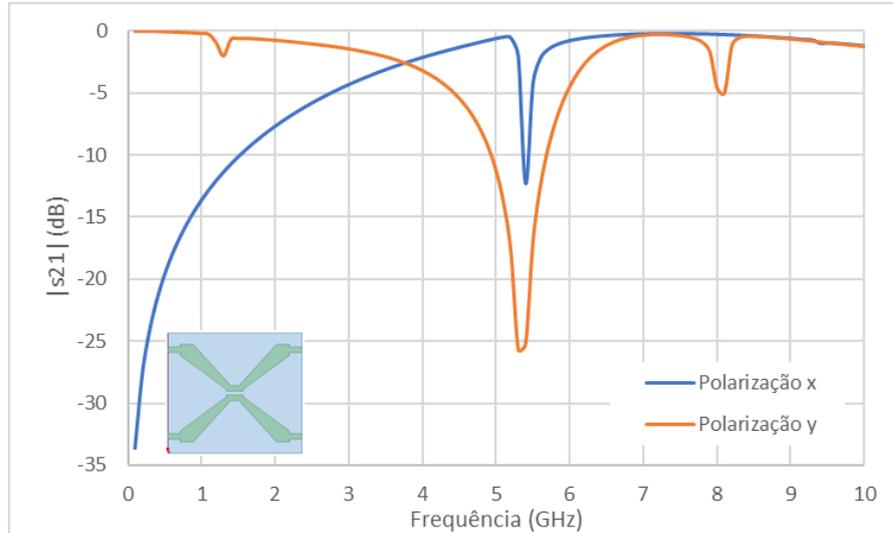


Figura 49 – Resposta em frequência, estrela de quatro braços com *gap* e linhas de alimentação.

De maneira semelhante, foi caracterizado apenas o dipolo, Figura 50. Com a inserção do dipolo, a FSS passou a apresentar a resposta em frequência mostrada na Figura 51. Como esperado, não é observada a ressonância na polarização y . Para a polarização x observa-se uma ressonância em 5,3 GHz. Comparando o valor calculado utilizando a equação (1), 4,9 GHz, com o valor obtido numericamente, verifica-se uma boa concordância. Portanto, a equação (1) é adequada para determinação dos valores iniciais, visando uma posterior otimização numérica.

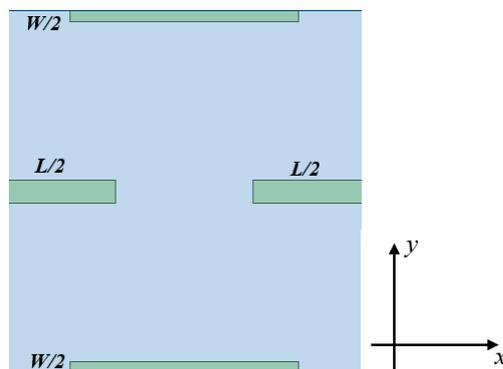


Figura 50 – Geometria dipolo.

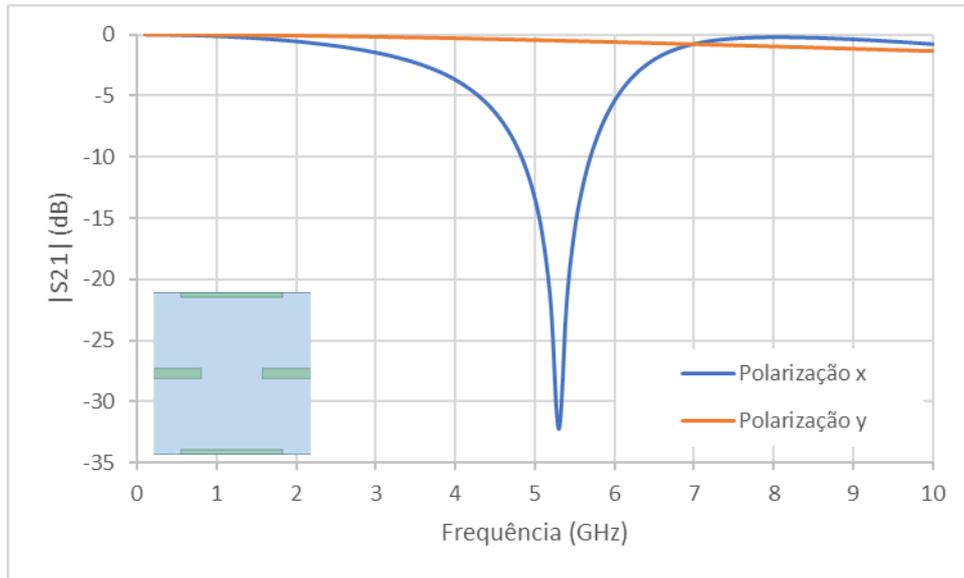


Figura 51 – Resposta em frequência do dipolo.

Ao associar as duas geometrias, Figura 46, obtém-se a resposta em frequência apresentada na Figura 52. Observa-se que as frequências de ressonância do dipolo e da estrela de quatro braços permanecem praticamente inalteradas (5,3 GHz).

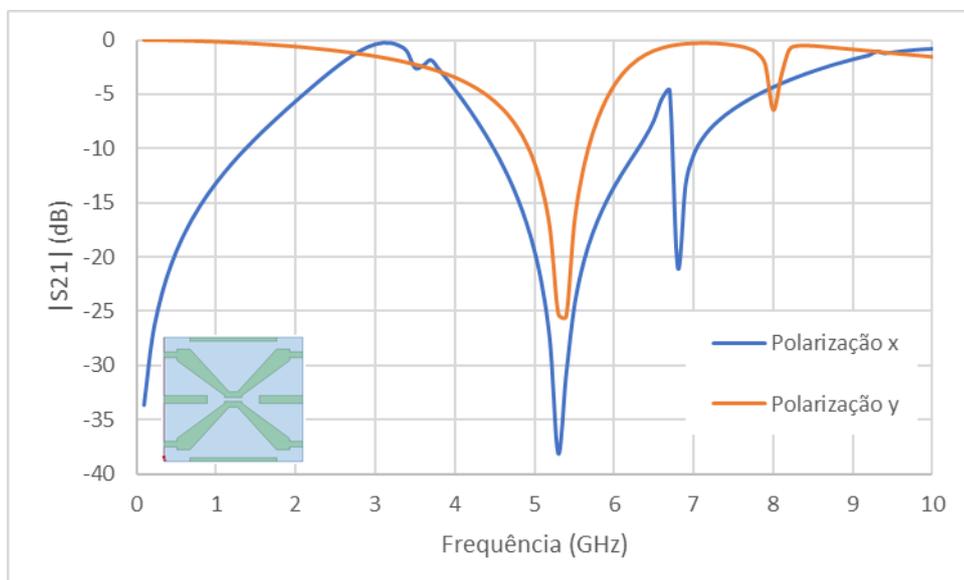


Figura 52 – Resposta em frequência das geometrias dipolo e estrela de quatro braços associadas.

Inserindo o varactor na estrela de quatro braços, Figura 53, é introduzida uma capacitância adicional, o que faz com que a respectiva frequência de ressonância seja reduzida.

Na caracterização numérica foi utilizado o modelo simplificado do varactor, em que cada tensão reversa está associada a uma capacitância e ocupa uma área de 1mm x 1mm, no centro do ponto de comutação. Em relação à capacitância foi usado um *lumped RLC boundary*, no ANSYS HFSS, Figura 54, para definir numericamente a resposta de frequência da FSS.

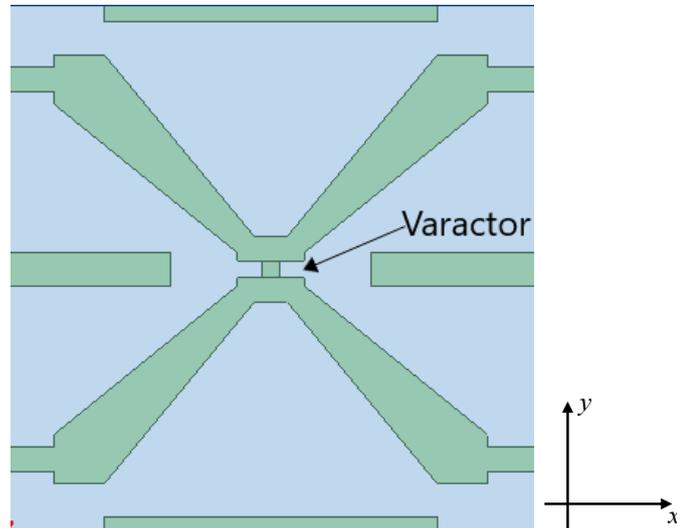


Figura 53 – Célula unitária com as geometrias dipolo e estrela de quatro braços associadas com o varactor inserido

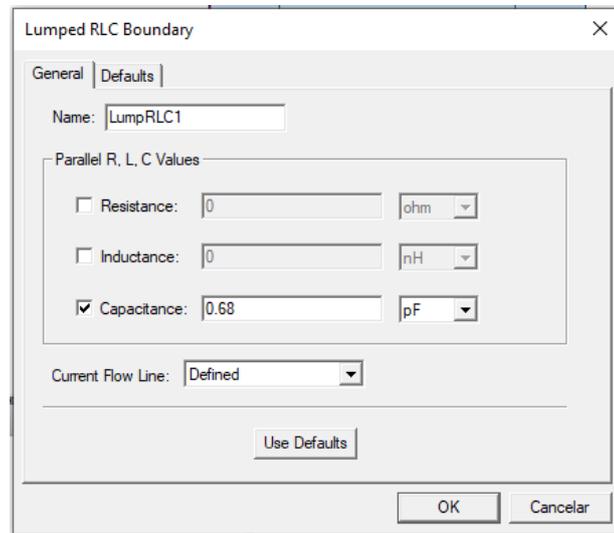


Figura 54 – Janela *lumped RLC boundary*.

Nas Figuras 55, 56 e 57 são apresentadas as respostas em frequências para as capacitâncias de 1,58 pF (1 V), 0,68 pF (5 V) e 0,50 pF (10 V), respectivamente.

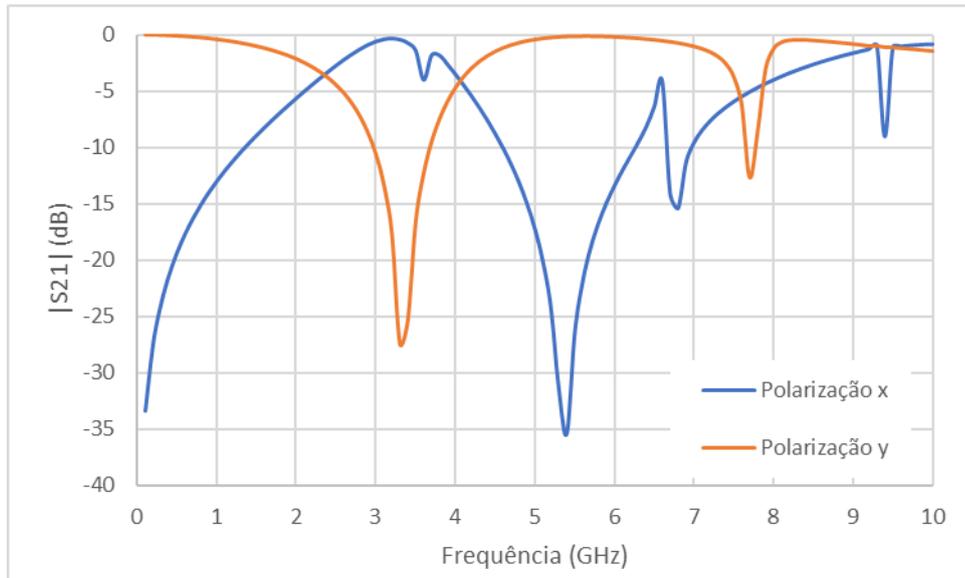


Figura 55 – Resposta em frequência das geometrias dipolo e estrela de quatro braços associadas, $C_{var.} = 1,58$ pF.

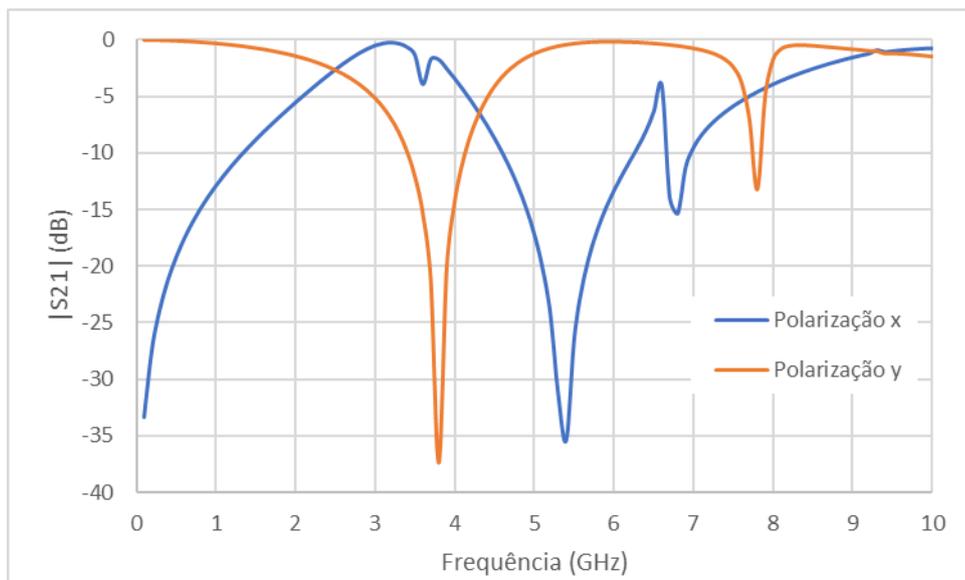


Figura 56 – Resposta em frequência das geometrias dipolo e estrela de quatro braços associadas, $C_{var.} = 0,68$ pF.

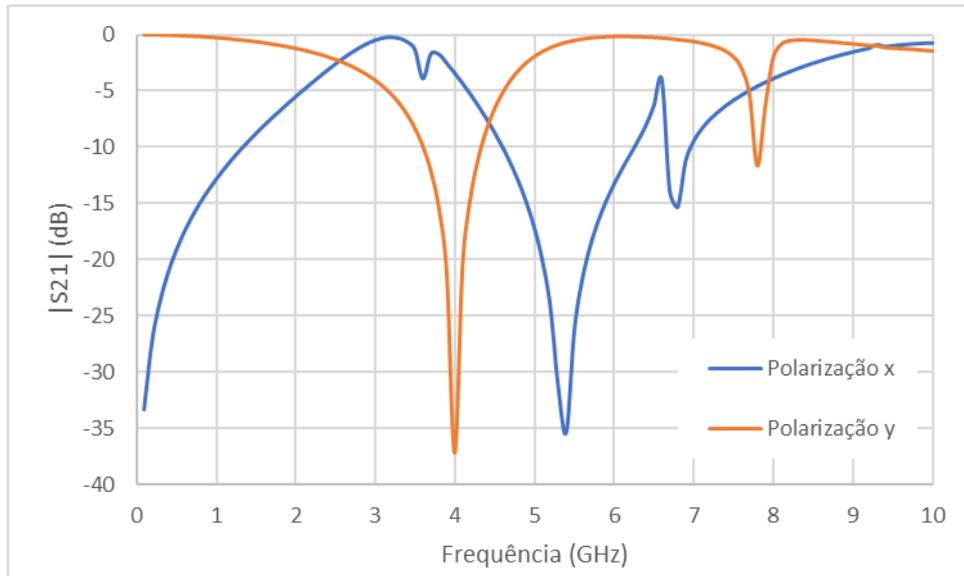


Figura 57 – Resposta em frequência das geometrias dipolo e estrela de quatro braços associadas, $C_{var.} = 0,5 \text{ pF}$.

Verifica-se que para a polarização x , Figura 58, ressonância do dipolo, a frequência de ressonância praticamente não se altera. Por outro lado, para a polarização y , a frequência de ressonância relativa à estrela de quadro braços varia com a capacitância do varactor.

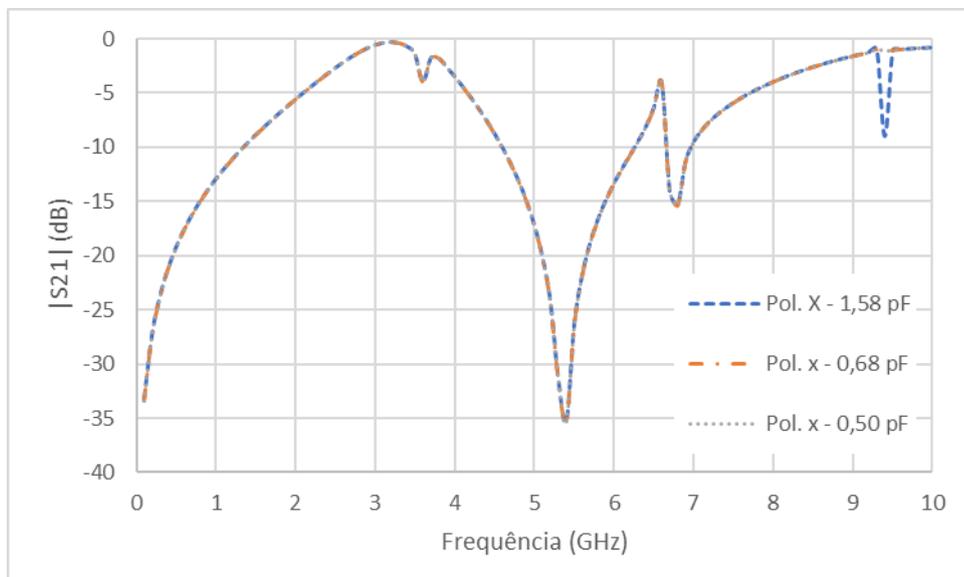


Figura 58 – Comparativo para as diferentes tensões para a polarização x .

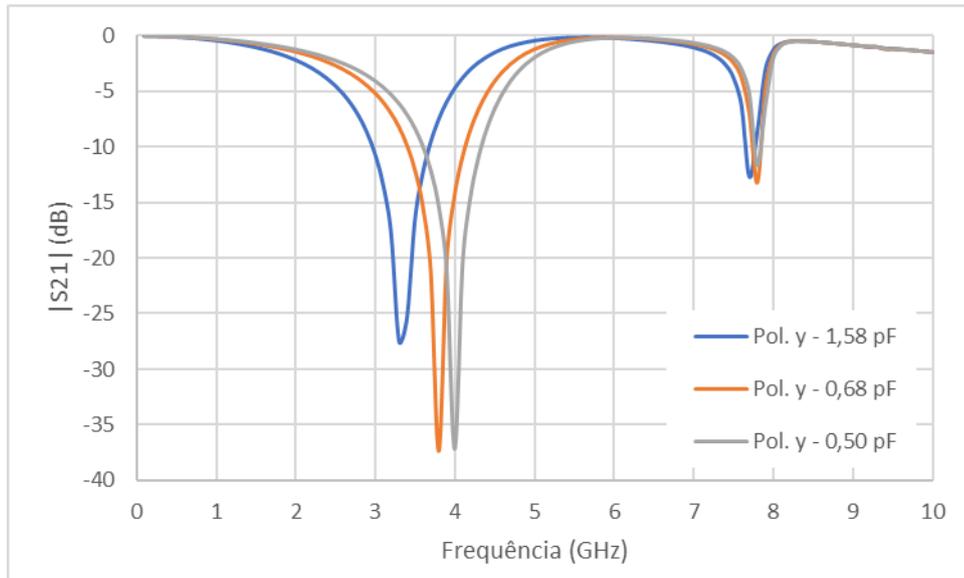


Figura 59 – Comparativo para as diferentes tensões para a polarização y .

Considerando os resultados numéricos obtidos, foi fabricada a FSS reconfigurável proposta, com o objetivo de verificar experimentalmente o seu funcionamento.

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA/IFPB, no qual foi utilizado um analisador de redes *Agilent E5071C*, duas antenas do tipo corneta A. H. *Systems* modelo SAS-571 (700 MHz – 18 GHz), [65]. O *setup* de medição é apresentado na Figura 60.

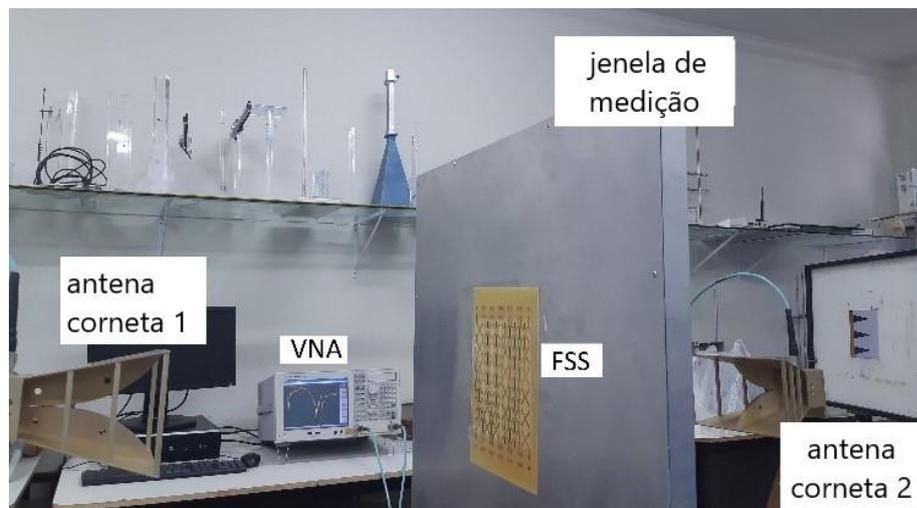


Figura 60 – *Setup* de medição para a FSS.

As dimensões da FSS reconfigurável fabricada são as mesmas descritas nos resultados numéricos. Nos resultados experimentais, foram consideradas as polarizações x e y , com incidência da onda eletromagnética normal a FSS. A FSS reconfigurável foi fabricada com 6×6 células, os varactores utilizados foram do tipo SMV1231 [62], para o qual a curva de Capacitância (pF) x Tensão Reversa (V) é apresentada na Figura 27. Na Figura 61, é apresentado o protótipo da FSS com os pontos de conexão para alimentação.

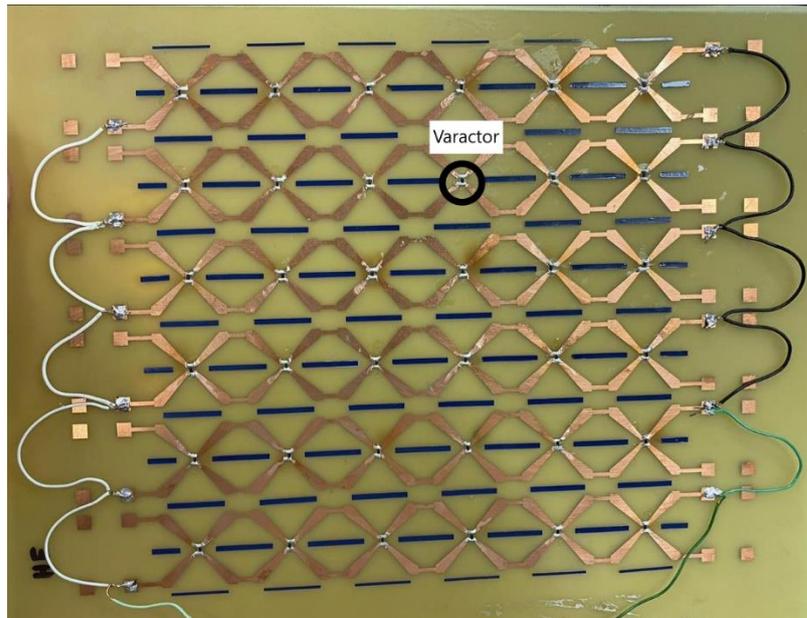


Figura 61 – Protótipo da FSS.

As respostas em frequência que serão apresentadas são para distintas tensões de polarização, que correspondem a diferentes valores de capacitância, Figuras 62, 63 e 64. O modelo do varactor utilizado, foi um modelo simplificado do varactor SMV1231, na qual cada tensão reversa está associada a uma capacitância. Em relação a capacitância foi usado o *lumped RLC boundary*, no ANSYS HFSS, para determinar numericamente a resposta de frequência da FSS.

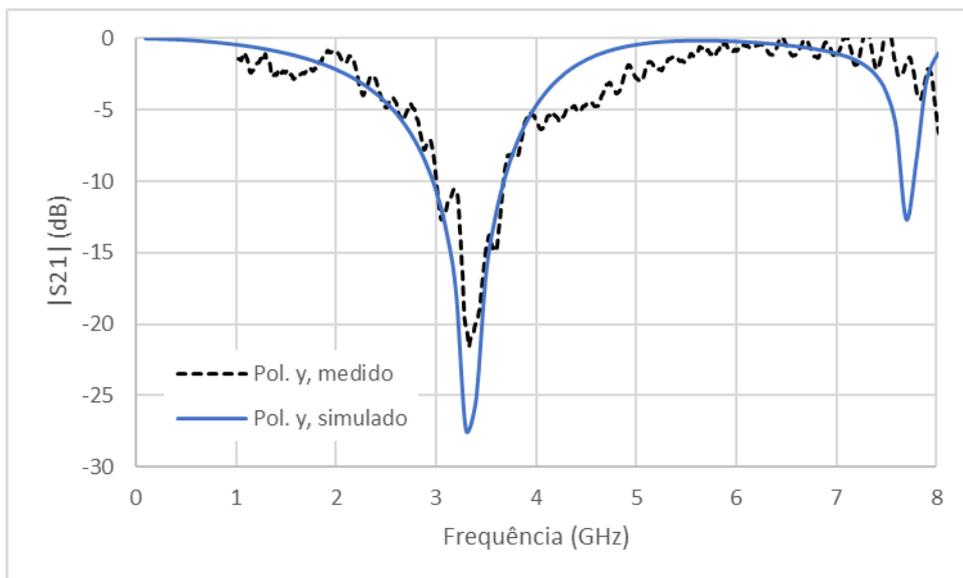


Figura 62 – Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) x Freq. (GHz), polarização y, VR = 1V (1,58 pF).

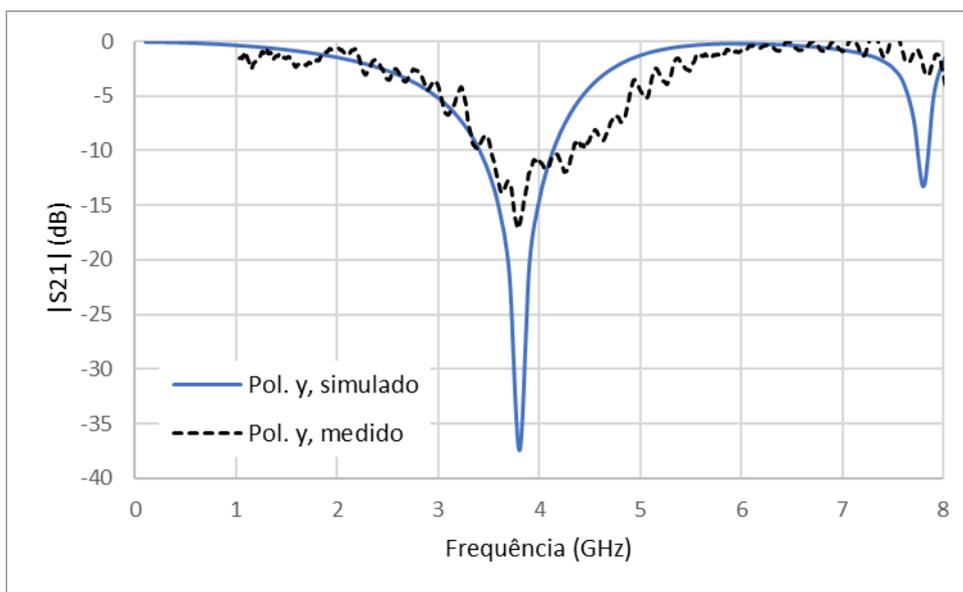


Figura 63 – Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) x Freq. (GHz), polarização y, VR = 5V (0,68 pF).

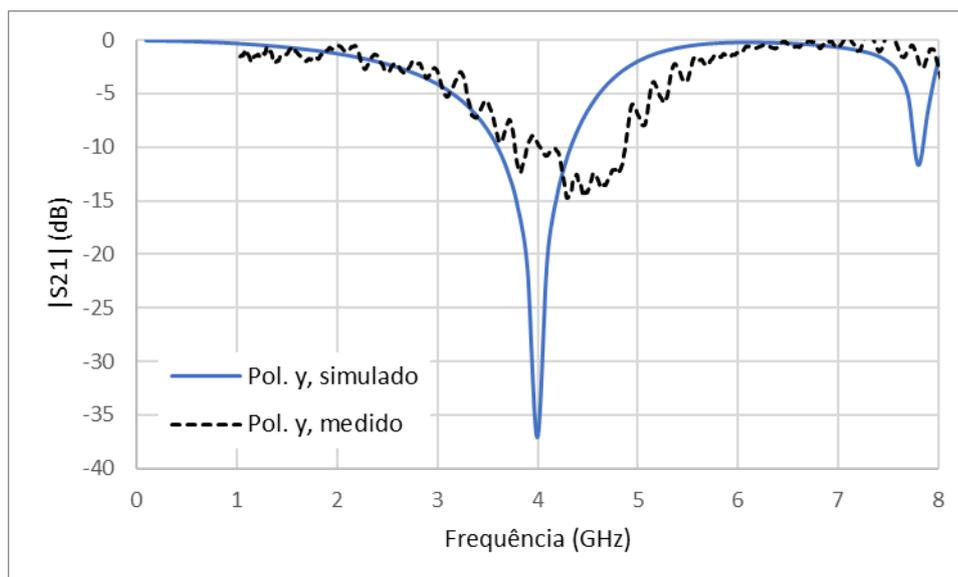


Figura 64 – Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) x Freq. (GHz), polarização y, VR = 10V (0,50 pF).

A Tabela 2 apresenta os resultados para as frequências de ressonância que foram obtidos ao aplicar as tensões reversas de 1V (1,58 pF), 5V (0,68 pF) e 10V (0,50 pF), as frequências de ressonâncias medidas e numéricas são, respectivamente, 3,2 GHz e 3,2 GHz, 3,8 GHz e 3,8 GHz, 4,2 GHz e 4,0 GHz, uma diferença máxima de 5,00%, um valor satisfatório. Verifica-se a variação frequência de ressonância com a tensão de polarização do varactor, confirmando a reconfigurabilidade da FSS.

Tabela 2 – Resultados para a polarização y.

Tipo de FSS		Frequência de ressonância		Diferença %
		Valores simulados	Valores medidos	
FSS	Sem linhas de alimentação	5,5 GHz	6,0 GHz	9,09 %
FSS com varactor	1 V	3,2 GHz	3,2 GHz	0,00 %
	5 V	3,8 GHz	3,8 GHz	0,00 %
	10 V	4,0 GHz	4,2 GHz	5,00 %

As Figuras 65, 66 e 67, apresentam os resultados para as frequências de ressonância correspondente à polarização x para as tensões reversas de 1V (1,58 pF), 5V (0,68 pF) e 10V (0,50 pF), respectivamente. Observe-se que a frequência de ressonância de 5,4 GHz (resultado numérico)/5,9 GHz (resultado medido) está associada ao dipolo, permanecendo praticamente constante. Assim sendo, a frequência de ressonância na polarização x, suprimida pelas linhas de alimentação dos varactores, é novamente obtida.

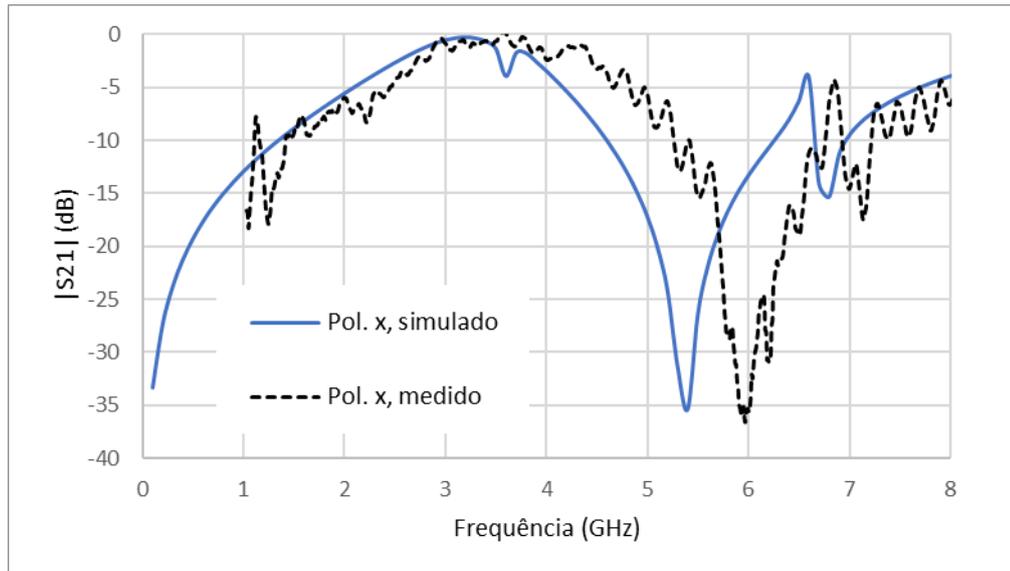


Figura 65 – Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) x Freq. (GHz), polarização x , VR = 1V (1,58 pF).

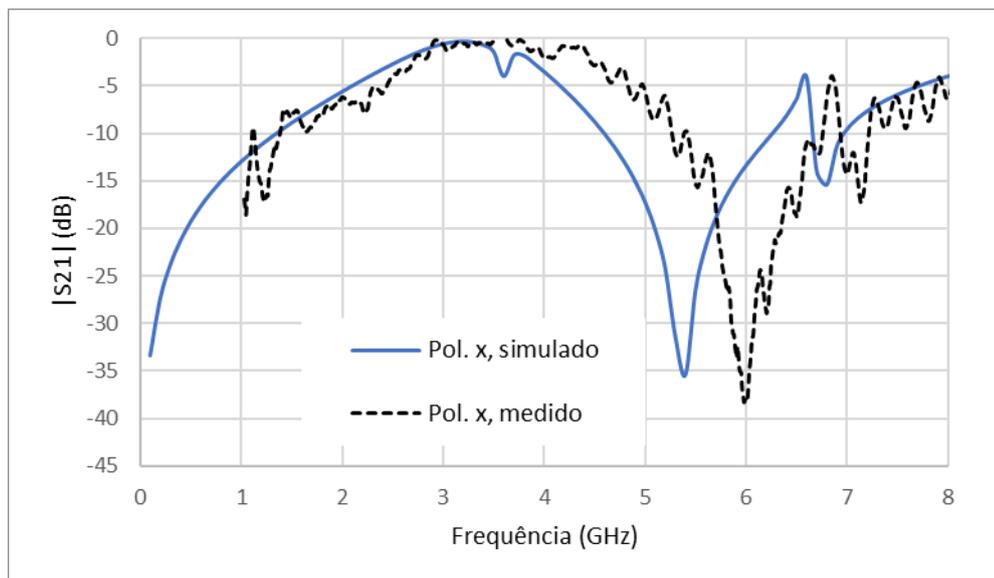


Figura 66 – Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) x Freq. (GHz), polarização x , VR = 5V (0,68 pF).

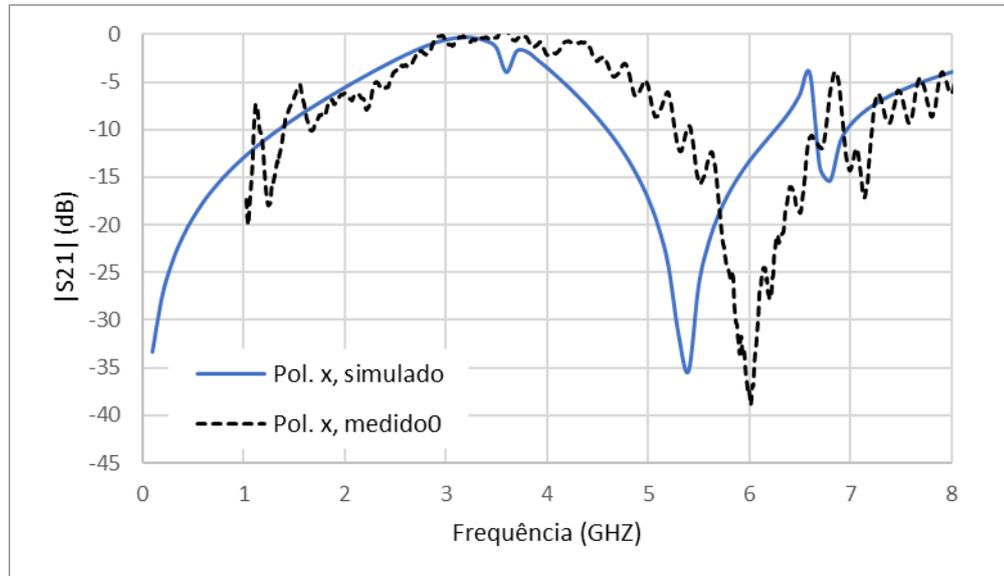


Figura 67 – Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) x Freq. (GHz), polarização x , VR = 10V (0,50 pF).

A Tabela 3 apresenta os resultados para as frequências de ressonância que foram obtidos ao aplicar as tensões reversas de 1V (1,58 pF), 5V (0,68 pF) e 10V (0,50 pF) na polarização x , as frequências de ressonâncias medidas e numéricas são, respectivamente, 5,9 GHz e 5,4 GHz para todas as tensões, como já esperado, sem variação para a polarização x com uma diferença de 9,25%, um valor satisfatório.

Tabela 3 – Resultados para a polarização x .

Tipo de FSS		Frequência de ressonância		Diferença %
		Valores simulados	Valores medidos	
FSS	Sem linhas de alimentação	3,2 GHz	3,3 GHz	3,12 %
FSS com varactor	1 V	5,4 GHz	5,9 GHz	9,25 %
	5 V	5,4 GHz	5,9 GHz	9,25 %
	10 V	5,4 GHz	5,9 GHz	9,25 %

Na Figura 68 a frequência de ressonância da FSS reconfigurável é apresentada em função da tensão reversa aplicada ao varactor. Note que é alcançado experimentalmente uma variação contínua da frequência de ressonância que vai de 3,20 GHz a 4,20 GHz, 1,00 GHz. Destaque-se que quando a capacitância atinge o valor mínimo, a partir de aproximadamente 0,53 pF, 10V, a frequência de ressonância da FSS reconfigurável atinge o seu valor máximo, 4,0 GHz simulado e 4,2 GHz medido.

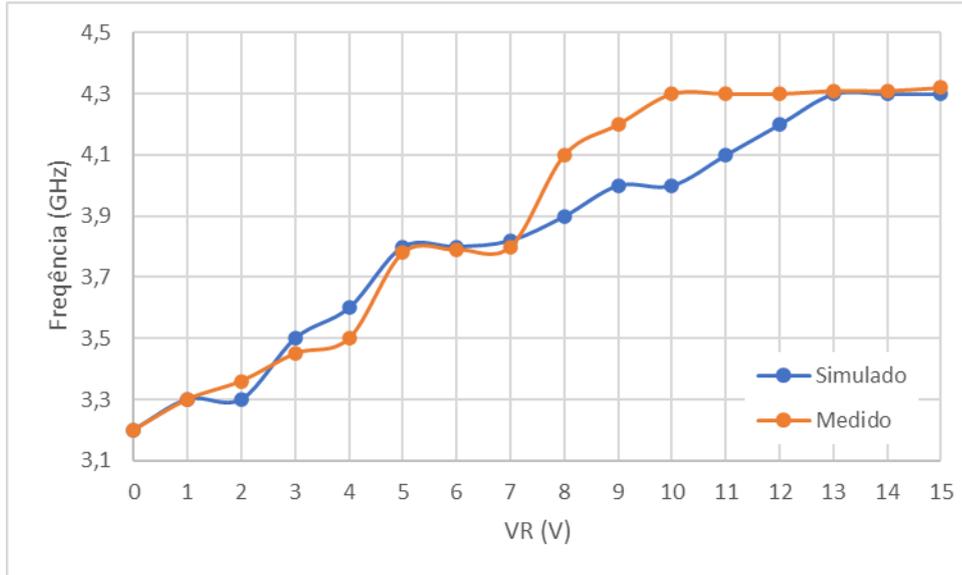


Figura 68 – Frequência de ressonância (GHz) × Tensão reversa (V), Varactor SMV1231.

Para um melhor entendimento do comportamento da frequência de ressonância após a inserção do varactor, seja considerada a Figura 69.

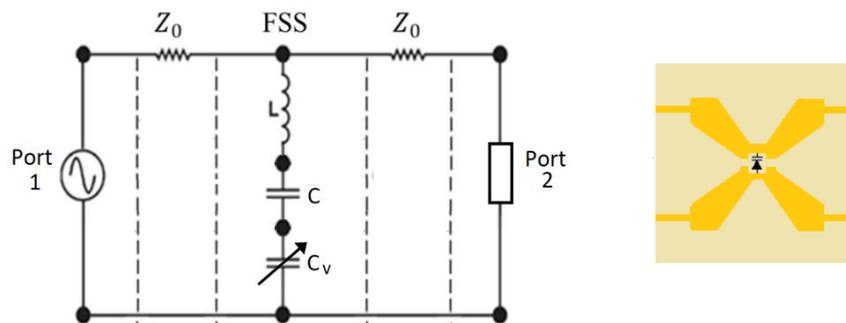


Figura 69 – Circuito equivalente da FSS considerando a inserção do varactor.

A capacitância do varactor (C_{var}) se encontra em série com a capacitância da FSS (C_{FSS}). Logo, a capacitância equivalente (C_{eq}) é dada por (4), [21], [24].

$$C_{eq} = \frac{C_{var}C_{FSS}}{C_{var} + C_{FSS}} \quad (4)$$

Se $C_{var} \gg C_{FSS}$, a capacitância equivalente será praticamente constante e igual a C_{FSS} , ou seja, a frequência de ressonância da FSS reconfigurável praticamente não varia, mesmo com a variação da capacitância do varactor. Para $C_{FSS} \gg C_{var}$, a capacitância equivalente é praticamente igual à capacitância do varactor (C_{var}), obtendo-se assim a variação da frequência

de ressonância da FSS reconfigurável.

4.3 VARIAÇÃO ANGULAR

Nesta subseção, será analisada apenas a polarização y , tendo sido realizadas as medições considerando a variação angular, da FSS reconfigurável com o varactor, para o mesmo *setup* de medição que já foi exposto anteriormente, Figura 60. Inicialmente as respostas em frequência são apresentadas considerando a tensão de polarização dos varactores em 0 V, denominada de V_0 . Em seguida, também foram considerados diferentes tensões reversas de 3 V e 6 V, que correspondem a V_1 e V_2 , respectivamente.

Na Figura 70, é apresentada a resposta em frequência para FSS reconfigurável considerando a tensão de 0 V e utilizou-se os seguintes ângulos: 0° , 20° , 40° .

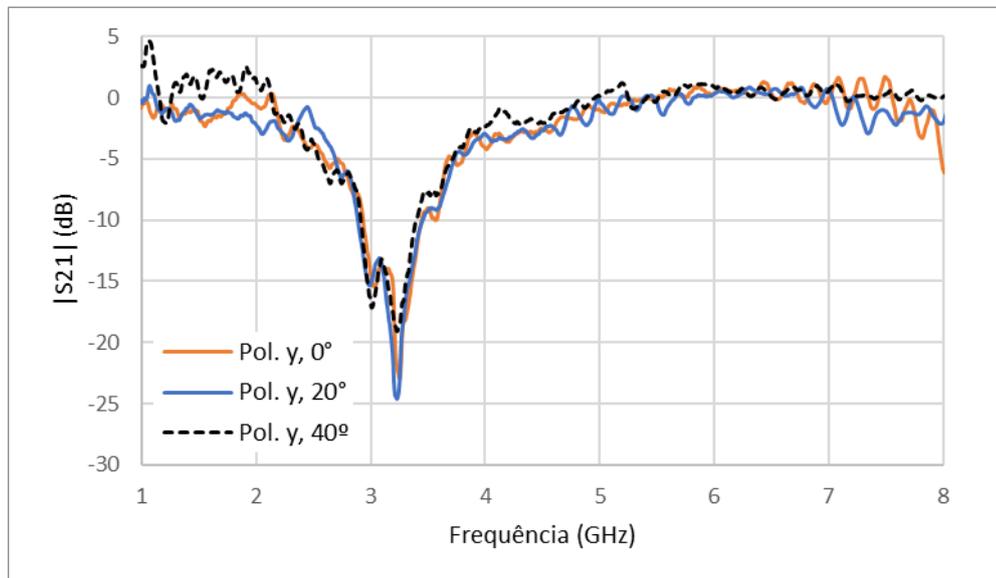


Figura 70 – Resposta em frequência, pol. y , FSS com varactor, V_0 .

A Tabela 4, apresenta o resumo dos resultados obtidos:

Tensão V_0	
Ângulos	Valores medidos (GHz)
0°	3,26
20°	3,26
40°	3,26

Pode-se observar que ao aplicar a tensão 0V e realizar a variação angular da FSS não há variação nas respostas em frequência.

Na Figura 71, é possível observar a resposta em frequência quando é aplicado uma tensão de 3 V e utilizando os mesmos ângulos já citado.

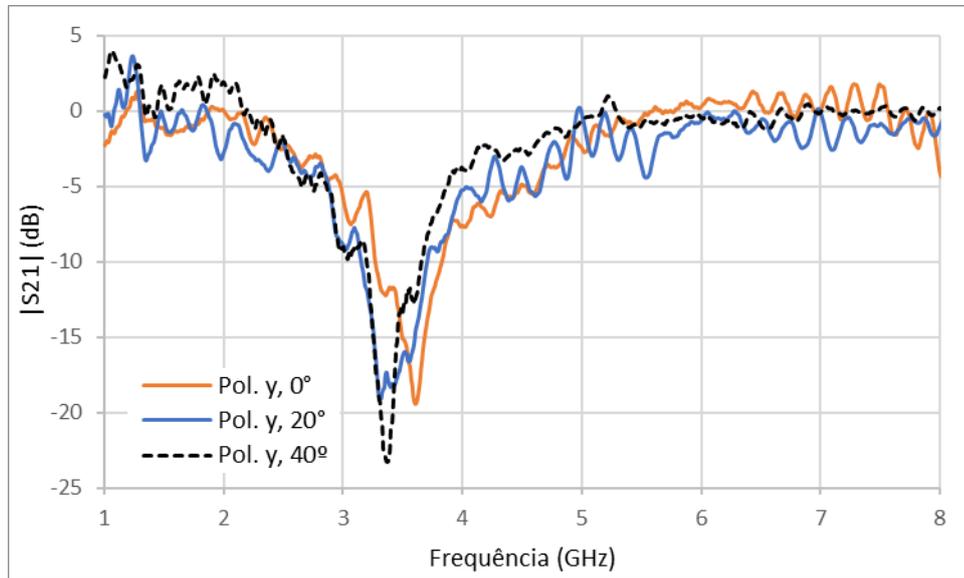


Figura 71 – Resposta em frequência, pol. y, FSS com varactor, V1.

A Tabela 5, apresenta o resumo dos resultados obtidos:

Tabela 5 – Resultados obtidos para tensão V1

Tensão V1	
Ângulos	Valores medidos (GHz)
0°	3,63
20°	3,39
40°	3,39

Pode-se observar que ao aplicar a tensão reversa de 3 V a FSS reconfigurável atenua a faixa de frequência de 3,63 GHz a 3,39 GHz e que as variações angular não produzem grandes alterações na resposta em frequência.

Na Figura 72, é possível observar a resposta em frequência quando é aplicado uma tensão de 6 V e utilizando os mesmos ângulos já citado anteriormente.

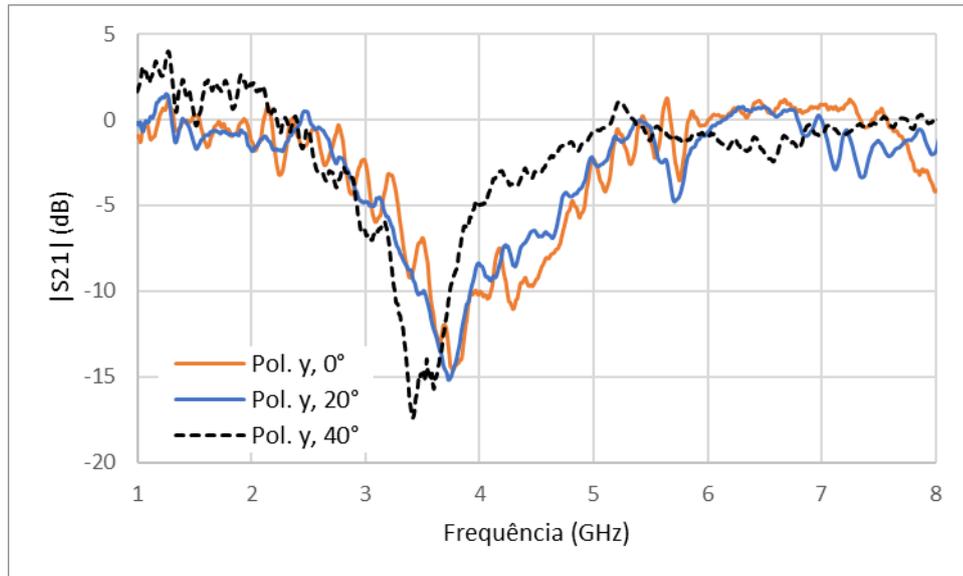


Figura 72 – Resposta em frequência, pol. y, FSS com varactor, V2

A Tabela 6, apresenta o resumo dos resultados obtidos:

Tabela 6 – Resultados obtidos para tensão V2

Tensão V2	
Ângulos	Valores medidos (GHz)
0°	3,78
20°	3,78
40°	3,61

Observa-se que ao aplicar a tensão reversa de 6 V a FSS atenua a faixa de frequência de 3,78 GHz à 3,61 GHz e que as variações angular não produzem grandes alterações na resposta em frequência.

Após os resultados apresentados neste Capítulo, pode-se afirmar que a FSS reconfigurável praticamente não apresentou uma variação de sua resposta em frequência em para uma variação angular de 0° a 40°, polarização y.

Já a variação angular para a polarização x não foi analisada porque para essa polarização não ocorre reconfirmação da FSS.

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação apresentou uma FSS reconfigurável, tendo como geometria da célula unitária a estrela de quatro braços associada ao dipolo. Como elemento ativo foi utilizado o varactor SMV1231.

O primeiro passo dado foi o estudo e fundamentos teóricos a cerca do tema, FSS e FSS reconfiguráveis, tendo sido destacados os conceitos básicos e principais. Foram abordados os conceitos básicos dos varactores, em especial o varactor SMV1231 usado nesta dissertação, e suas principais características.

Na caracterização numérica, foi utilizado o *software* comercial *Ansys HFSS*, que se baseia no Método dos Elementos Finitos (FEM). Já na caracterização experimental, se utilizou um *setup* de medição que foi composto por duas antenas cornetas padrão, uma transmissora e a outra receptora, uma janela de medição, uma fonte de tensão e um analisador de redes. A FSS reconfigurável é eletronicamente modificada através da aplicação da tensão reversa nos varactores, e uma de suas vantagens é a simplicidade do circuito de polarização.

Os resultados numéricos e experimentais são apresentados para as polarizações y e x . Para a polarização y , a ressonância associada à geometria estrela de quatro braços apresentou uma variação de 3,2 GHz até 4,2 GHz, apresentando uma faixa de variação de 1,0 GHz na caracterização experimental, que é muito interessante. Destaque-se ainda a relação entre a frequência de ressonância e a variação da capacitância do varactor, confirmando o modelo apresentado em [21], [24].

Para a polarização x , verificou-se que a introdução dos dipolos na geometria possibilitou a obtenção da ressonância suprimida pelas linhas de alimentação dos varactores.

Por fim, para a polarização y , foram realizadas as medições para a incidência da onda eletromagnética considerando a variação angular da FSS reconfigurável, constatando-se que variações angulares até 40° não produzem alterações consideráveis na resposta em frequência da estrutura.

Como proposta para a continuidade deste trabalho propõe-se

- Aplicar a FSS reconfigurável proposta em antenas inteligentes.

- Avaliar o controle das linhas de varactores individualmente;
- Avaliar a possibilidade de aplicação da FSS reconfigurável desenvolvida em cascata, seja com FSS de mesma geometria, ou com outras geometrias.

5.1 TRABALHOS PUBLICADOS E ACEITOS PARA PUBLICAÇÃO

G. Neto, J. C. e Silva, I. B. G. Coutinho, D. C. G. Fernandes, L. M. S. Duarte and A. G. Barboza, "Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Associando as Geometrias Dipolos Cruzados e Matrioska", 2020 19º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO), Rio de Janeiro, Brasil, 2020.

G. Neto, J. C. e Silva, D. C. G. Fernandes, L. M. S. Duarte and G. J. Morais, "Recovering Suppressed Resonance Frequency by Bias Lines in Reconfigurable FSS", 2021 Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe), 2021. (Aguardando publicação)

G. Neto, J. C. e Silva, I. B. G. Coutinho, D. C. G. Fernandes, L. M. S. Duarte and A. G. Barboza, "Development of Reconfigurable Frequency Selective Surface Associating Cross Dipoles and Matryoshka Geometries", 2021 Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe), 2021. (Submetido, aguardando resultado da revisão final)

REFERÊNCIAS

- [1] Cisco Visual Networking, “CISCO,” Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2017-2022, 2020. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>. [Acesso em 31 julho 2020].
- [2] C. Mooney, M. Hari, A. Arden, M. Habib, J. Park e L. M. Martinez, “Industry Top Trends 2019: Telecommunications,” *S&P Global Ratings*, p. ., 15 novembro 2018.
- [3] G. & L. Yang, X. & Li, Y. & Cui, H. & Xu, M. & Wu, D. & Rydén, H. & Redhwan e Sakib, “A telecom perspective on the Internet of Drones: From LTE-Advanced to 5G,” March 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1803/1803.11048.pdf>. [Acesso em 08 setembro 2020].
- [4] Cisco Visual Networking, “CISCO,” CISCO, 9 março 2020. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>.. [Acesso em 2020 março 2020].
- [5] I. Shayea, M. H. Azmi, T. A. Rahman, M. Ergen, C. T. Han e A. Arsal, “Spectrum gap analysis with practical solutions for future mobile data traffic growth in Malaysia,” *IEEE Access* 24910-24923, n° doi: 10.1109/ACCESS.2018.2890302, 2019.
- [6] A. Gomes Neto, A. G. DAssuncao Junior, J. C. Silva, I. S. S. Lima, L. M. Moura e R. G. G. Carvalho, “Ajuste da Resposta em Frequência de FSS com Geometria Estrela de Quatro Braços,” *MOMAG2014*, 2014.
- [7] S. Habib, G. I. Kiani e M. F. U. Butt, “Interference mitigation and WLAN efficiency in modern buildings using energy saving techniques and FSS,” *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, n° doi: 10.1109/APS.2016.7696191 , pp. 965-966, 2016.
- [8] Q. Zeng, J. Li e T. Denidni, “Solution for overcoming interference - radiation pattern reconfigurable antennas,” *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2018.
- [9] J. C. Vardaxoglou, **Frequency Selective Surfaces – Analysis and Design**,” *Research Studies Press*, 1997.
- [10] A. Edalati e T. A. Denidni, “Frequency selective surfaces for beam-switching applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, n° 1, pp. 195-200, 2018.

- [11] P. R. e L. J. R., “Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 66, pp. 215-234, 2017.
- [12] B. A. Munk, **Frequency Selective Surfaces**, Canadá: Premeq, 2000.
- [13] A. L. P. S. Campos, **Superfícies Seletivas em Frequência – Análise e Projeto**, IFRN Editora, Natal - RN, 2008.
- [14] G. H. Elzwawi, A. Kesavan, R. Alwahishi e T. A. Denidni, “A New Corner-Reflector Antenna with Tunable Gain Based on Active Frequency Selective Surfaces,” *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, doi: 10.1109/OJAP.2020.2979053, 2020.
- [15] C. Gu, S. Gao, B. Sanz-Izquierdo, E. A. Parker, W. Li, X. Yang e Z. Cheng, “Frequency-Agile Beam-Switchable Antenna,” *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 65, nº 8, 2017.
- [16] B. A. Decena, J. R. Luzon e M. C. L. Purisima, “2.4 GHz Pattern Reconfigurable Corner Reflector Antennas Using Frequency Selective Conductor Loops and Strips,” *IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pp. 2914-2919, 2017.
- [17] G. H. Elzwawi, H. H. Elzuwawi, M. M. Tahseen e T. A. Denidni, “Frequency Selective Surface-Based Switched-Beamforming Antenna,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 48042-48050, 2018.
- [18] S. N. Azemi, K. Ghorbani e W. S. T. Rowe, “A reconfigurable FSS using a spring resonator element,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett*, vol. 12, pp. 781-784, 2013.
- [19] S. A. Nauroze, L. Novelino, M. M. Tentzeris e G. H. Paulino, “Inkjet-printed “4D” tunable spatial filters using on-demand foldable surfaces,” *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, pp. 1575-1578, 2017.
- [20] D. F. Mamedes, A. G. Neto, J. C. e. Silva e J. Bornemann, “Design of reconfigurable frequency-selective surfaces including the PIN diode threshold region,” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 18, pp. 1483-1486, 2018.
- [21] A. G. Neto, J. C. e. Silva, A. G. Barbosa, I. B. G. Coutinho, M. d. O. Alencar e M. C. d. Andrade, “Modeling the Resonant Behavior of Continuously Reconfigurable FSS Based on Four Arms Star Geometry,” *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2020.

- [22] A. G. Neto, J. Silva, I. Coutinho, D. Fernandes, L. Duarte e A. Barboza, “Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Associando as Geometrias Dipolos Cruzados e Matrioska,” *19º Simpósio brasileiro de micro-ondas e optoeletrônica (SBMO) e 14º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMAG) - MOMAG*, 2020.
- [23] Thamyres da Silva Evangelista, **Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços para Aplicação em 2,4 GHz**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2018.
- [24] Amanda Gomes Barboza, **Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Utilizando Varactores**, Dissertação de Mestrado, Instituto Federal da Paraíba, 2020.
- [25] Thamyres. da Silva Evangelista, **FSS como Superestrato Reconfiguráveis Aplicadas em Antenas Planares para 5G NR**, Campina Grande - PB: Qualificação de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, 2020.
- [26] A. G. Neto, J. N. d. Carvalho, A. N. d. Silva, H. d. P. A. Ferreira, I. S. S. Lima e J. I. Fernandes, “Four arms star: An useful geometry for switchable FSS,” *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, pp. 1-5, 2013.
- [27] A. G. Neto, J. C. e. Silva, A. P. d. Costa, J. B. d. O. Silva, L. C. M. d. Moura e C. Peixeiro, “Band pass FSS with slot four arms star geometry,” *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2015.
- [28] A. Gomes Neto, E. B. J. B. Dupouy e A. P. Costa, “Superfície Seletiva em Frequência Ativa Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços,” *MOMAG 2016 - 12º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo 17º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica*, 2016.
- [29] A. Gomes Neto, J. C. Silva, J. Nogueira De Carvalho, A. P. Da Costa e L. C. M. De Moura, “Bandpass frequency selective surface using asymmetrical slot four arms star geometry,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, 2016.
- [30] A. G. Neto, J. C. e. Silva, J. B. d. O. Silva e C. Peixeiro, “ "A dual-band frequency selective surface using four arms star geometry associated to trapezoidal rings for WiFi applications," ” *47th European Microwave Conference (EuMC)*, 2017.
- [31] T. S. Evangelista, A. Gomes Neto, J. C. e. Silva, D. F. Mamedes, J. S. Souza e M. O.

- Alencar, “Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços para Aplicação em 2,4 GHz,” *8º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica 13º CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, vol. 1, 2018.
- [32] A. G. Neto, J. C. Silva, A. G. Barbosa, D. F. Mamede, I. B. G. Coutinho e M. O. Alencar, “Varactor-Tunable Four Arms Star Bandstop FSS With a Very Simple Bias Circuit,” *EUCAP*, 2019.
- [33] André Nascimento da Silva, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de U**, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [34] R. H. C. Maniçoba, A. F. Santos., A. V. Lovato, N. M. Oliveira-Neto, D. B. Brito, A. L. P. S. Campos e A. G. d’Assunção., “Numerical Investigation of Multilayer Fractal FSS,” *International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)*, vol. 4, 2014.
- [35] P. H. F. Silva, A. L. P. S. Campos e E. E. C. Oliveira, “Design of miniaturized frequency selective surfaces using Minkowski Island fractal,” *Journal of Microwaves, Opt. Electromagnetic Applications*, vol. 9, no. 1, 2010.
- [36] M. R. d. Silva, C. d. L. Nobrega, P. H. d. F. Silva e A. G. D’Assunção., “Dual-polarized Band-stop FSS Spatial Filters Using Vicsek Fractal Geometry,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, nº 1, 2013.
- [37] M. R. d. Silva, C. d. L. Nobrega, P. H. d. F. Silva e A. G. D’Assunção, “Optimization of FSS With Sierpinski Island Fractal Elements Using Population-based Search Algorithms and MLP Neural Network,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, nº 4, 2013.
- [38] Ianes Barbosa Grécia Coutinho, **Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequência Associando as Geometrias Dipolos Cruzados e Matrioska**, Dissertação de Mestrado, Instituto Federal da Paraíba, 2019.
- [39] A. G. Neto, J. C. e Silva, J. Nogueira de Carvalho, J. Do Nascimento Cruz and H. De Paiva Almeida Ferreira, "Analysis of the resonant behavior of FSS using matryoshka geometry," *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/IMOC.2015.7369142.
- [40] A. G. Neto, T. R. D. Sousa, J. C. E. Silva e D. F. Mamedes, “A Polarization Independent Frequency Selective Surface Based on the Matryoshka Geometry,” *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium – IMS*, vol. 1, nº 1, pp. 999-1002, 2018.

- [41] Thayuan Rolim de Sousa, **Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência Baseada na Geometria Matrioska Independente da Polarização**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2019.
- [42] S. V. Hum e J. Perruisseau-Carrier, “Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: a review,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, n° 1, 2014.
- [43] J. -C. Zhang, Y. -Z. Yin e R. Y, ““Resonant characteristics of frequency selective surfaces on ferrite substrates”,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 95, 2009.
- [44] K. ElMahgoub, F. Yang e A. Z. Elsherbeni, “Design of novel reconfigurable frequency selective surfaces with two control techniques,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 35, pp. 135-145, 2013.
- [45] D. Ferreira, I. Cuiñas, R. F. S. Caldeirinha e T. R. Fernandes, “3-D mechanically tunable square slot FSS,” *IEEE Trans. Antennas Propag*, vol. 65, n° 1, pp. 242-250, 2017.
- [46] B. Sanz-Izquierdo e E. A. Parker, “Dual polarized reconfigurable frequency selective surfaces,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, n° 0, pp. 764-771, 2014.
- [47] Manuelle Regina Tavares de Oliveira, **Superfície Seletiva de Frequência Reconfigurável (RFSS) Baseada em Dipolo Cruzado**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- [48] J. Yuan, S. Liu, X. Kong e H. Yang, “A reconfigurable frequency selective surface for tuning multi-band frequency response separately,” *Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation*, 2013.
- [49] W. Tang, J. Zhu, C. Wang, J. Ge, Z. Yu and W. Zhuang, "Waveguide 3-D FSSs by 3-D printing technique," *2016 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2016, pp. 675-678, doi: 10.1109/ICEAA.2016.7731488.
- [50] T. H. Brandão, H. R. D. Filgueiras, S. A. Cerqueira, J. F. Mologni and A. Bogoni, "FSS-based dual-band cassegrain parabolic antenna for RadarCom applications," *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/IMOC.2017.8121131.
- [51] P. C. Kim, D. G. Lee, I. S. Seo e G. H. Kim, ““Low-observable radomes composed of composite sandwich constructions and frequency selective surface,” *Compos Sci*

Technol, vol. 68, n° 9, pp. 2161-2170, 2008.

- [52] A. G. Neto, J. C. Silva, J. S. Souza, M. O. Alencar e T. S. Evangelista, “Desenvolvimento de uma FSS Banda Dupla para Aplicações em Paredes Inteligentes,” *XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, SBrT*, 2017.
- [53] S. Tedjini, N. Karmakar, E. Perret, A. Venna, R. Koswatta and R. E-Azim “Hold the chips,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 14, pp. 56-65, 2013.
- [54] W. C. Gibson, “The Method of Moments,” *Electromagnetics, New York, USA*, 2000.
- [55] L. E. Vaz, “Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas,” *Rio de Janeiro: Elsevier*, 2011.
- [56] J. L. Volaskis, A. Chatterjee e L. C. Kempel, “Finite Element Method for Electromagnetics, Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications,” *IEEE Press*, 1998.
- [57] B. Henri, T. Mohammed, R. Nathalie, **The Wave Concept in Electromagnetism and Circuits: Theory and Applications**, Print ISBN:9781848219595, Online SBN:9781119332701, doi: 10.1002/9781119332701, © ISTE Ltd, 2016
- [58] Valdemir Praxedes da Silva Neto, **Caracterização de Circuitos Planares de Micro-ondas pelo Método Iterativo das Ondas**, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dissertação de Mestrado, 2013.
- [59] F. Bayatpur, **Metamaterial-Inspired Frequency-Selective Surfaces**, Tese de Doutorado. The University of Michigan, 2009.
- [60] ESA, Microwave Material RF Characterization Setup. [Online]. Disponível em: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/09/Microwave_Material_RF_Characterization_setup. [Acesso em 02 de maio de 2021].
- [61] L. F. T. Pinto, **Eletrônica: eletrônica analógica**, vol. 2. São Paulo, Fundação Padre Anchieta, 2011.
- [62] Skyworks Solutions, “SMV123x Series: Hyperabrupt Junction Tuning Varactors,” *Data Sheet, Note*, 2016.
- [63] Andrécia Pereira da Costa, **Implementação de uma Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços**, Instituto Federal da Paraíba: Dissertação de Mestrado, 2016.
- [64] M. Bouzlama, M. Traii, T. A. Denidni, A. Gharsallah, "Reconfigurable frequency

selective surface for beam-switching applications," in *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 1, pp. 69-74, 8 1 2017.

[65] E5071C Analisador de redes datasheet. Disponível em: <http://www.keysight.com/pt/pdx-x202270-pn-E5071C/ena-series-network-analyzer?nid=-32496.1150429&cc=BR&lc=por&pm=ov>. Acessado em 30 de março de 2021.

[66] Agilent Technologies, "RF & Microwave AppCAD," 2002.