

Laryssa Maria de Sousa Duarte

**SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA
RECONFIGURÁVEIS UTILIZANDO DIODOS PIN E
INDUTORES PARA RF ASSOCIANDO AS GEOMETRIAS
DIPOLOS CRUZADOS E MATRIOSKA**

João Pessoa - PB

Julho de 2021

Laryssa Maria de Sousa Duarte

**SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA
RECONFIGURÁVEIS UTILIZANDO DIODOS PIN E
INDUTORES PARA RF ASSOCIANDO AS GEOMETRIAS
DIPOLOS CRUZADOS E MATRIOSKA**

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

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Alfrêdo Gomes Neto

Coorientador: Prof. Dr. Jefferson Costa e Silva

João Pessoa – PB, Julho de 2021

Laryssa Maria de Sousa Duarte – maria.laryssa@gmail.com

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

D812s Duarte, Laryssa Maria de Sousa.

Superfícies seletivas em frequência reconfiguráveis utilizando diodos PIN e indutores para RF associando as geometrias dipolos cruzados e matrioska / Laryssa Maria de Sousa Duarte. – 2021.

88 f. : il

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

Orientador : Profº D.r Alfrêdo Gomes Neto.

Coorientador : Profº D.r Jefferson Costa e Silva.

1. Superfície seletiva em frequência. 2. FSS reconfigurável. 3. Dipolos cruzados. 4. Matrioska. 5. Diodo PIN. Título.

CDU 621.396.67(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária – CRB 15/132

Laryssa Maria de Sousa Duarte

**Superfícies Seletivas em Frequência Reconfiguráveis Utilizando
Diodos PIN e Indutores para RF Associando as Geometrias
Dipolos Cruzados e Matrioska**

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 15/07/2021

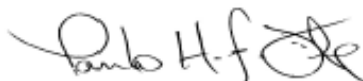
BANCA EXAMINADORA



Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Orientador



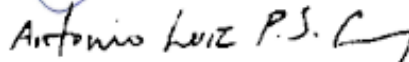
Jefferson Costa e Silva, Dr. - IFPB
Coorientador



Paulo Henrique da Fonseca Silva, Dr. - IFPB
Examinador Interno



Joabson Nogueira de Carvalho, Dr. - IFPB
Examinador Interno



Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos, Dr. - UFRN
Examinador Externo

João Pessoa – PB

Julho 2021

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado saúde, inteligência e coragem para fazer esta dissertação. Depois, a minha família por ter proporcionado todo suporte necessário ao longo da minha vida e mostrar-me a importância da educação. Agradeço em especial, a minha mãe Maria Salete de Sousa Silva que sempre acreditou no meu potencial, muito mais do que eu.

Gostaria de agradecer a minha tia, madrinha e segunda mãe, Severina de Almeida Silva, sem o apoio dela, jamais teria tido a determinação de fazer o mestrado e continuar trabalhando.

Não tenho nem palavras para agradecer ao meu orientador Dr. Alfrêdo Gomes Neto, ele foi e continuará sendo um exemplo de profissional e ser humano. Me orientou de forma magnífica, dando os puxões de orelha quando necessário e auxiliando durante toda a pesquisa.

Quero agradecer também ao IFPB, por todo o apoio e incentivo a pesquisa, nesta instituição fiz o técnico em eletrotécnica, a graduação em engenharia elétrica e agora finalizo o mestrado em engenharia elétrica. A instituição me ensinou não só conceitos técnicos, mas ensinamentos que moldaram a minha personalidade. Agradeço a todos os funcionários que fazem parte do instituto, do reitor ao pessoal de serviços gerais.

Agradeço a coordenação da pós-graduação em engenharia elétrica que é sensacional, com professores capacitados, laboratórios equipados e equipe qualificada. Gostaria de agradecer em especial a professora Dra. Suzete Élide e aos professores Dr. Jefferson Silva, Dr. Joabson Nogueira e Dr. Paulo Henrique Silva, pelas orientações dadas nos trabalhos acadêmicos, como também na vida.

Agradeço aos meus amigos e colegas do mestrado em especial a Sara, Ravilla e Diego, sem eles eu teria desistido no início das disciplinas. E por fim, mas não menos importante aos meus gestores e colegas de trabalho, que me deram suporte para conciliar a carreira acadêmica e profissional.

“Comece fazendo o que é necessário,
depois o que é possível, e de repente
você estará fazendo o impossível.”

São Francisco de Assis

RESUMO

Nesta dissertação é proposta uma superfície seletiva em frequência reconfigurável, associando as geometrias dipolos cruzados e matrioska. Com o objetivo de obter três faixas de frequências ressonantes, duas fixas relacionadas à geometria matrioska, e uma que pode ser ativada ou não, relacionada à geometria de dipolos cruzados. A reconfiguração da FSS é realizada com inserção do diodo PIN nos braços verticais da geometria dipolos cruzados. Nos braços horizontais, foi inserido o indutor para RF, com o intuito de manter as três frequências de ressonância na polarização x . São descritos no trabalho os fundamentos básicos de uma FSS, do diodo PIN, do indutor RF e os procedimentos de projeto. Durante a caracterização numérica das estruturas foi utilizado o *software* comercial ANSYS *Electronics Desktop*, módulo HFSS, analisando as ressonâncias de cada geometria e das geometrias associadas, bem como dos diferentes estados de polarização do diodo PIN (*ON* e *OFF*). Um protótipo foi fabricado e caracterizado, observando-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, com uma largura de banda de reconfiguração de 0,24 GHz, de 2,14 GHz a 2,38 GHz, para uma variação de pelo menos 10 dB entre os estados ON e OFF.

Palavras chave: Superfície seletiva em frequência, FSS reconfigurável, dipolos cruzados, matrioska, diodo PIN.

ABSTRACT

In this work, a reconfigurable frequency selective surface is proposed, associating crossed dipoles and matryoshka geometries. It has the objective to get three resonant frequency bands, two fixed associated matryoshka geometry, and one can be activated and or not, related to the crossed dipoles geometry. The FSS reconfiguration is performed by inserting PIN diode in the vertical arms of the crossed dipoles geometry. In the horizontal arms, it was inserted the inductor RF, it has the objective to maintain three resonant frequencies in x polarization. The works reveal the basics of an FSS, PIN diode, Inductor RF and the procedures. In the numerical characterization of the structures the commercial software ANSYS Electronics Desktop, HFSS module, analyzing the resonances of each geometry and associated geometries, as well as the different polarization states of the PIN diode (ON and OFF). A prototype was made and characterized, observing in it a good agreement between the numerical and experimental results, with reconfiguration broadband of 0,24 GHz, from 2,14 GHz to 2,38 GHz, for a variation of 10 dB, between ON and OFF states.

Keywords: Frequency selective surface, reconfigurable FSS, crossed dipole, matryoshka, PIN diode

Lista de Figuras

Figura 1 - Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços.....	20
Figura 2 - Boneca russa matrioska.....	22
Figura 3 - Geometria matrioska quadrada.....	22
Figura 4 - Geometria matrioska circular independente da polarização.....	22
Figura 5 - Geometria matrioska associada com dipolos cruzados.....	23
Figura 6 - Célula unitária da FSS com as geometrias associadas.....	24
Figura 7 - Célula unitária da FSS reconfigurável com diodos PIN e indutor para RF.....	24
Figura 8 - Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS.....	26
Figura 9 - FSS do tipo abertura.....	27
Figura 10 - FSS do tipo <i>patch</i>	28
Figura 11 - Elementos do Grupo 1.....	28
Figura 12 - Elementos do Grupo 2.....	29
Figura 13 - Elementos do Grupo 3.....	29
Figura 14 - Elementos do Grupo 4.....	29
Figura 15 - Elementos do Grupo 5.....	30
Figura 16 - Geometrias investigadas no GTEMA-IFPB.....	30
Figura 17 - FSS de anteparo fino.....	31
Figura 18 - FSS do tipo anteparo espesso.....	31
Figura 19 - Exemplos de FSS passivas.....	32
Figura 20 - FSS reconfiguráveis mecanicamente.....	32
Figura 21 - FSS reconfiguráveis eletronicamente.....	33

Figura 22 - Anteparo do forno micro-ondas.....	33
Figura 23 - Antena de banda dupla com sub-refletor usando FSS.....	34
Figura 24 - Radome utilizando FSS.....	34
Figura 25 - Aplicação de FSS com janela inteligente.....	35
Figura 26 - Análise da FSS através de um circuito elétrico equivalente.....	37
Figura 27 - Janela do <i>boundry</i> RLC.....	38
Figura 28 - Configuração para caracterização experimental da FSS com antenas cornetas.....	39
Figura 29 - Configuração para caracterização experimental da FSS com antenas cornetas e lentes.....	39
Figura 30 - Configuração para caracterização experimental da FSS em câmara anecóica.....	40
Figura 31 - Configuração para caracterização experimental da FSS com janela de medição com absorvedores.....	40
Figura 32 - Configuração para caracterização experimental da FSS com janela de medição sem absorvedores.....	41
Figura 33 - Modelo básico para o diodo PIN.....	42
Figura 34 - Diodo PIN BAR 64-03 W.....	43
Figura 35 - Indutor para RF fixo 4310LC-132KEB.....	44
Figura 36 - Impedância \times Frequência do Indutor para RF fixo 4310LC-132KEB....	44
Figura 37 - Geometria dipolos cruzados.....	45
Figura 38 - Obtenção da geometria matrioska independente de polarização.....	47
Figura 39 - Obtenção da FSS reconfigurável.....	49
Figura 40 - Dimensões da célula unitária da FSS reconfigurável.....	53
Figura 41 - Resposta em frequência da geometria dipolos cruzados.....	53

Figura 42 - Resposta em frequência da geometria matrioska.....	54
Figura 43 - Resposta em frequência associando as geometrias matrioska e dipolos cruzados para polarizações x e y	55
Figura 44 – Célula unitária da RFSS01.....	56
Figura 45 - Resposta em frequência da FSS reconfigurável com diodo PIN e curto-circuito, polarização x	57
Figura 46 – Célula unitária da RFSS02.....	57
Figura 47 - Resposta em frequência da FSS reconfigurável com diodo PIN e indutor para RF, polarização x	58
Figura 48 - Resposta em frequência da FSS reconfigurável com diodo PIN e curto-circuito, polarização y	59
Figura 49 - Resposta em frequência da FSS reconfigurável com diodo PIN e indutores, polarização y	59
Figura 50 - Resposta em frequência da RFSS01, diodo PIN no estado ligado, polarizações x	61
Figura 51 - Resposta em frequência da RFSS01, diodo PIN no estado desligado, polarizações x e y	61
Figura 53 - Resposta em frequência da RFSS01, diodo PIN no estado desligado, polarizações x e y	62
Figura 52 - Resposta em frequência da RFSS02, diodo PIN no estado ligado, polarizações x e y	62
Figura 54 - Configuração de medição.....	63
Figura 55 – FSS com geometrias dipolos cruzados e matrioska.....	63
Figura 56 - Resposta em frequência da FSS reconfigurável sem os diodos PIN e sem os curtos-circuitos – Resultados experimentais.....	64

Figura 57 - FSS reconfigurável com os diodos PIN e os curtos-circuitos – RFSS01.....	65
Figura 58 - Respostas em frequência da RFSS01, polarização x , diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado).....	66
Figura 59 - Respostas em frequência da RFSS01, polarização x , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12$ V, ligado).....	66
Figura 60 - Respostas em frequência da RFSS01, polarização x , diodos PIN ligado.....	67
Figura 61 - Resposta em frequência da RFSS01, polarização y , diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado).....	67
Figura 62 - Resposta em frequência da RFSS01, polarização y , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12,0$ V, ligado).....	68
Figura 63 - Resposta em frequência da RFSS01, polarização y , diodos PIN diretamente e reversamente polarizados.....	70
Figura 64 - FSS reconfigurável com os diodos PIN e os indutores RF – RFSS02.	70
Figura 65 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização x , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12$ V, ligado).....	71
Figura 66 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização x , diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado).....	72
Figura 67 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização y , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12$ V, ligado).....	73
Figura 68 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização y , diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado).....	73
Figura 69 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização x , diodos PIN	74
Figura 70 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização y , diodos ligados/desligado.....	75

Figura 71 - Resposta em frequência da RFSS02 com variação angular, polarização y , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12 \text{ V}$, ligado).....	76
Figura 72 - Resposta em frequência da RFSS02 com variação angular, polarização y , diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0 \text{ V}$, desligado).....	76
Figura 73 - Geometria equivalente.....	78
Figura 74 - Frequência de ressonância associada à geometria dipolos cruzados em função de La , diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0 \text{ V}$, desligado).....	78
Figura 75 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização y , diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0 \text{ V}$, desligado), $La = 5,0 \text{ mm}$	79
Figura 77 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização y , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12 \text{ V}$, ligado), $La = 5,0 \text{ mm}$	80
Figura 78 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização x , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12 \text{ V}$, ligado), $La = 5,0 \text{ mm}$	80

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dimensões da célula unitária da FSS reconfigurável.....	52
Tabela 2 - Frequências de ressonâncias – Geometrias isoladas.....	54
Tabela 3 - Frequências de ressonâncias – Geometrias associadas.....	55
Tabela 4 - Frequências de ressonâncias – Resumo das geometrias associadas e isoladas.....	55
Tabela 5 – Resultados numéricos na polarização x	58
Tabela 6 – Resultados numéricos na polarização y	60
Tabela 7 - Frequências de ressonâncias das geometrias associadas.....	64
Tabela 8 - Frequências de ressonâncias da RFSS01 na polarização x	69
Tabela 9 - Frequências de ressonâncias da RFSS01 na polarização y	69
Tabela 10 – Frequências de ressonâncias da RFSS02 na polarização x	74
Tabela 11 - Frequências de ressonâncias RFSS02 na polarização y	74
Tabela 12 - Frequências de ressonâncias da RFSS02 na polarização y , com variação angular, diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0$ V, desligado).....	77
Tabela 13 - Frequências de ressonâncias da RFSS02 na polarização y , com variação angular, diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12$ V, ligado).....	77

Lista de Siglas

DCR	<i>Direct Current Resistance</i> - Resistência de corrente contínua
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i> - Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
FEM	<i>Finite Element Method</i> - Método dos Elementos Finitos
FR-4	<i>Flame-Retardant type 4</i> , material dielétrico retardante de chamas, à base de epóxi reforçado com fibras de vidro, tipo 4
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i> - Superfícies seletivas em frequência
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
IoT	<i>Internet of Things</i> - Internet das Coisas
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i> - Sistemas Micro Eletromecânicos
MoM	<i>Method of Moments</i> - Método dos Momentos
RF	Rádiofrequência
RFFS	<i>Reconfigurable Frequency Selective Surface</i> - Superfícies seletivas em frequência reconfigurável
SRF	<i>Self Resonant Frequency</i> – Frequência auto-ressonant
WCIP	<i>Wave Concept Iterative Procedure</i> - Método Iterativo das Ondas

Lista de Símbolos

λ_0	Comprimento da onda no espaço livre
C	Capacitância
d_{xi}	Distância da lateral da matrioska até o espaçamento g ao longo do eixo x
d_{yi}	Distância da lateral da matrioska até o espaçamento g ao longo do eixo y
f_{res}	Frequência de ressonância
ϵ_r	Constante dielétrica do substrato
$\epsilon_{ref-dip}$	Permissividade elétrica relativa do dipolo cruzado
$\epsilon_{ref-CPW}$	Permissividade elétrica relativa de uma guia de ondas coplanar sem o plano
ϵ_{ref-MS}	Permissividade elétrica relativa de uma microfita
g	Espaçamento entre as microfitas
h	Espessura do substrato
L	Indutância
L_s	Indutância em série
L_{ef}	Comprimento efetivo
L_{dip}	Comprimento do dipolo cruzado
L_x	Comprimento do <i>patch</i> da matrioska na direção x
L_y	Comprimento do <i>patch</i> da matrioska na direção y
S_{11}	Parâmetro S, correspondente ao coeficiente de reflexão
S_{21}	Parâmetro S, correspondente ao coeficiente de transmissão
W	Largura da microfita
W_x	Comprimento da célula unitária ao longo do eixo x

W_y Comprimento da célula unitária ao longo do eixo y

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1 SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA.....	26
2.1.1 Classificações das FSS.....	27
2.1.1.1 Preenchimento do elemento básico.....	27
2.1.1.2 Geometria do elemento básico.....	28
2.1.1.3 Espessura da camada de metalização.....	30
2.1.1.4 FSS passivas e FSS reconfiguráveis.....	32
2.1.2 Aplicações das FSS.....	33
2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE.....	35
2.2.1– Caracterização numérica.....	36
2.2.2– Caracterização experimental.....	38
2.3 DIODOS PIN.....	41
2.4 INDUTORES.....	43
3 DESCRIÇÃO DO PROJETO.....	45
3.1– GEOMETRIA DIPOLOS CRUZADOS.....	45
3.2– GEOMETRIA MATRIOSKA INDEPENDENTE DE POLARIZAÇÃO.....	46

3.3– FSS RECONFIGURÁVEL COM AS GEOMETRIAS ASSOCIADAS.....	49
4 RESULTADOS.....	52
4.1 RESULTADOS NUMÉRICOS.....	52
4.1.2 Resultados numéricos incluindo os diodos PIN e indutores para RF	56
4.1.3 Resultados numéricos para polarização y	58
4.1.4 Resultados numéricos para as polarizações x e y	60
4.2 RESULTADO EXPERIMENTAIS.....	63
4.3 ADEQUAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	77
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	82
TRABALHOS PUBLICADOS.....	82
REFERÊNCIAS.....	83

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os sistemas de telecomunicações tornaram-se indispensáveis ao dia-a-dia dos usuários, especialmente os sistemas de comunicações móveis. Aplicações como Inteligência Artificial (IA), computação em nuvem, IoT (*Internet of Things*), *big data*, *cybersecurity*, automação de processos robóticos e sistemas de comunicações móveis da quinta geração (5G), são apenas alguns exemplos das demandas existentes [1]-[3]. Com isto, torna-se necessário limitar as interferências entre os sistemas e enlaces de alta capacidade para transmissão de dados. Embora vários desses enlaces sejam ópticos, é indispensável a utilização de enlaces via rádio. Dadas as limitações da disponibilidade de torres e outros espaços para instalação de antenas, vários sistemas de telecomunicações, com seus próprios requisitos de frequência e potência, compartilham espaços restritos, Figura 1 [4].

Figura 1 - Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços



Fonte:Autoral

Ainda que haja disponibilidade de espaço para instalar equipamentos relacionados aos enlaces de alta capacidade, existem ainda ambientes específicos (hospitais, presídios, embaixadas etc.) que impõem restrições aos serviços de telecomunicações. Por outro lado, ambientes com uso intensivo de serviços de telecomunicações (centros comerciais, prédios de escritórios, etc.) também requerem estratégias para limitar as interferências [5].

Essas restrições têm exigido novas soluções, como antenas reconfiguráveis [6], [7] e edifícios eletromagneticamente inteligentes [8], [9]. Com o intuito, de limitar essas interferências e maximizar a utilização das antenas, uma das opções que vêm sendo adotada é a utilização das superfícies seletivas em frequência (FSS - *Frequency selective surfaces*). Uma das abordagens empregadas é o uso de superfícies seletivas em frequência, FSS, em sua forma reconfigurável.

As FSS são filtros espaciais, geralmente planares e comportam-se como um filtro rejeita-faixa ou passa-faixa. Entre suas características podem ser citadas o baixo custo e as dimensões e o peso reduzidos. Além disso, podem ser integradas a outras partes dos sistemas de telecomunicações, o que as tornam bastante atrativas para, por exemplo, otimizar o desempenho das antenas [6], [11].

Como extensão das FSS, surgem as FSS reconfiguráveis. Enquanto as FSS passivas têm sua resposta em frequência fixa, as FSS reconfiguráveis apresentam uma resposta em frequência variável. A reconfiguração pode ser obtida de forma mecânica ou eletrônica, como descrito mais adiante [6], [11].

O Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA) do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) tem investido em pesquisas de novas geometrias do elemento da célula unitária da FSS objetivando contribuir para a evolução tecnológica das FSS. Dentre essas geometrias, podem ser citadas a matrioska [12], [13], a estrela de quatro braços [4], [14], em forma de U [15] e fractal [16].

A geometria matrioska é inspirada nas bonecas russas denominadas matrioskas, que são constituídas por uma série de bonecas colocadas uma dentro da outra, expandindo-se da mais externa (maior) até a mais interna (menor) ocupando apenas o volume da boneca mais externa, Figura 2 [17].

Figura 2 - Boneca russa matrioska



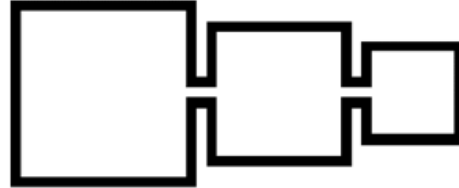
Fonte:[18]

Nesse sentido, na geometria matrioska os anéis permanecem interligados, Figura 3, diferentemente dos anéis concêntricos, fazendo com que seu comprimento efetivo aumente, reduzindo a sua frequência de ressonância e apresentando características de miniaturização e operação multibanda [19], [20]. Inicialmente, essa geometria era dependente da polarização, entretanto, mais recentemente, foi apresentada uma configuração independente da polarização [21], Figura 4.

Figura 3 - Geometria matrioska quadrada



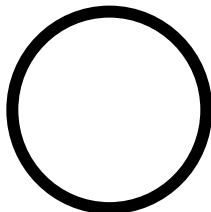
(a) Anel matrioska



(b) Anel matrioska expandido

Fonte: [22]

Figura 4 - Geometria matrioska circular independente da polarização



(a) Anel circular



(b) Primeiro anel matrioska



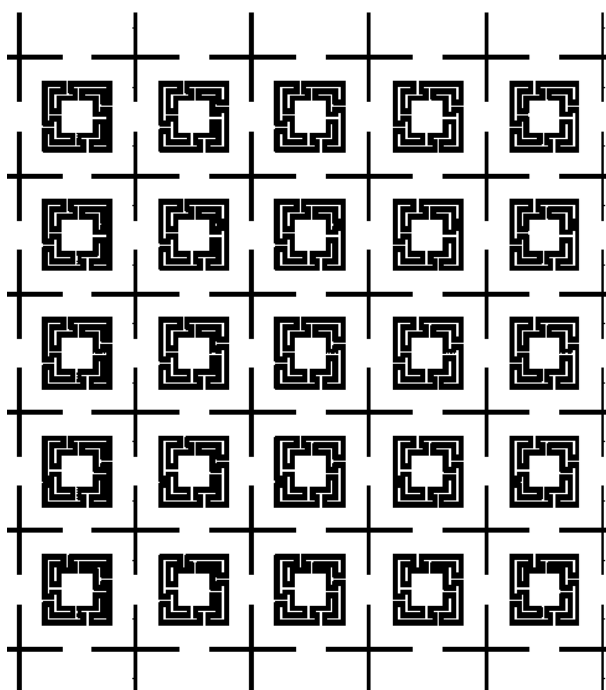
(c) Segundo anel matrioska

Fonte:[21]

Uma das maneiras de obter respostas em frequência específicas é associar geometrias de diferentes dimensões em uma mesma FSS. Entretanto, para a mesma geometria com dimensões diferentes, uma limitação é a ocorrência de múltiplas ressonâncias e/ou acoplamento entre essas geometrias, dificultando o ajuste de uma das frequências de ressonância, sem afetar a outra ressonância [23].

Uma alternativa para superar essa limitação é a utilização de geometrias diferentes, como por exemplo os dipolos cruzados e a geometria matrioska em uma mesma FSS, Figura 5. Dessa forma, como as distribuições de campo para ressonância de cada geometria são distintas, minimiza-se o acoplamento, possibilitando uma maior flexibilidade de projeto [24].

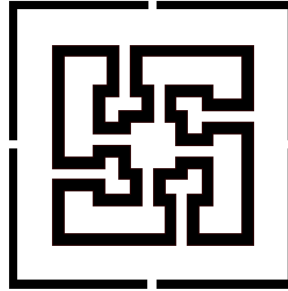
Figura 5 - Geometria matrioska associada com dipolos cruzados



Fonte: [24]

Em [24] foi apresentada uma FSS associando as geometrias dipolos cruzados e matrioska, tendo sido obtida uma FSS com três bandas de frequências, sendo duas associadas à geometria matrioska e uma aos dipolos cruzados, Figura 6. Uma das vantagens dessa FSS é a possibilidade de ajustar separadamente as frequências de ressonâncias associadas a cada geometria.

Figura 6 - Célula unitária da FSS com as geometrias associadas

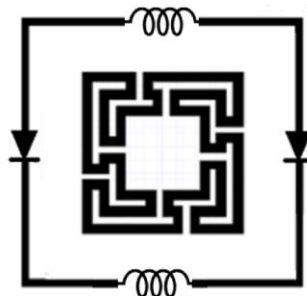


Fonte: Autoral

Dando continuidade à pesquisa apresentada em [24], nesta dissertação é apresentada uma FSS reconfigurável eletronicamente. Por modificar a sua resposta em frequência em função de demandas específicas (diferentes frequências de ressonância e/ou largura de banda, por exemplo), as FSS reconfiguráveis, têm sido investigadas por diversos grupos de pesquisa, [6], [10], incluindo o GTEMA-IPFB [4], [24]-[25]. Basicamente, a modificação da resposta em frequência pode ser obtida a partir da alteração da geometria da célula unitária, o que pode ser realizado mecanicamente ou eletronicamente [10].

Dessa forma, é proposta uma FSS reconfigurável utilizando diodos PIN e indutores para RF associando as geometrias dipolos cruzadas e matrioska, Figura 7, que opera em três faixas de frequência, das quais uma é reconfigurável. O diodo PIN é o elemento ativo que proporciona a reconfiguração da FSS na polarização y e o indutor para RF mantém as três frequências de ressonância na polarização x .

Figura 7 - Célula unitária da FSS reconfigurável com diodos PIN e indutor para RF



Fonte: Autoral

Esta dissertação é organizada nos seguintes Capítulos:

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos sobre FSS, sua classificação quanto ao preenchimento da célula unitária, à geometria e à espessura da camada de metalização, aplicações, técnicas de análise, diferença entre FSS passiva e FSS reconfigurável e os componentes eletrônicos utilizados na FSS.

O Capítulo 3 identifica os procedimentos para obtenção da FSS reconfigurável proposta, a descrição do projeto para conseguir as geometrias e as equações utilizadas no processo.

No Capítulo 4 são explicados os resultados das caracterizações numéricas e experimentais da FSS reconfigurável, associando as geometrias dipolos cruzados e matrioska, com o diodo PIN e o indutor para RF.

No Capítulo 5 estão as considerações finais cujo, são feitos os comentários dos resultados e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

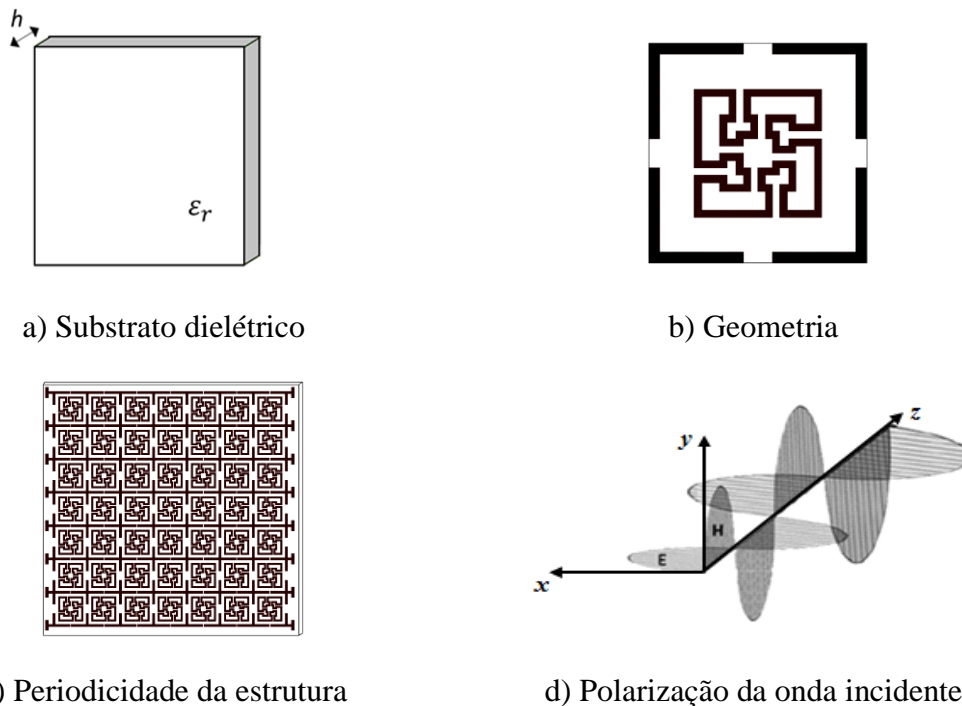
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA

As FSS são arranjos periódicos gravados na superfície de um substrato dielétrico, de espessura h e constante dielétrica ϵ_r [26]. Embora possam ser tridimensionais, [27], nesta dissertação serão consideradas apenas as FSS planares, ou seja, quando uma das dimensões é muito menor que o comprimento de onda no espaço livre correspondente à frequência de ressonância [10], [26], [28], [29].

As FSS são projetadas com a finalidade de refletir ou transmitir ondas eletromagnéticas em diferentes faixas de frequências, consistindo de *patches* ou condutores e aberturas ou *slots* [10]. Dentre os fatores que influenciam a resposta em frequência das FSS, pode-se citar as dimensões da célula unitária, geometria, características do substrato (constante dielétrica, espessura, entre outros) e a polarização da onda incidente, como ilustrado na Figura 8, [28], [29].

Figura 8 - Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS.



Fonte: Autoral

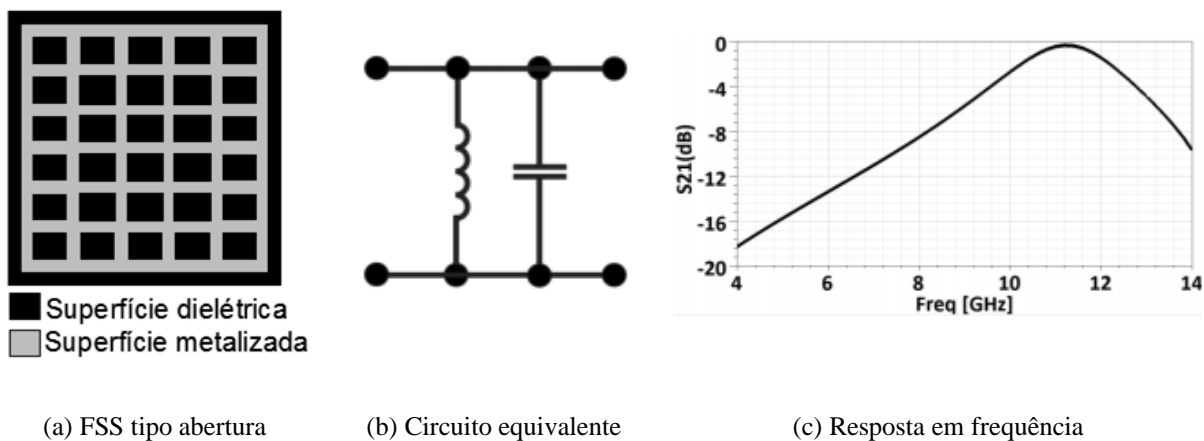
2.1.1 Classificações das FSS

As FSS podem ser classificadas de diversas maneiras, citando-se entre essas: quanto ao preenchimento da célula unitária, geometria do elemento da célula unitária, espessura da camada de metalização e reconfiguração dos arranjos. Estes são aspectos clássicos encontrados na literatura para classificação de FSS [26].

2.1.1.1 Preenchimento do elemento básico

Uma FSS pode apresentar o elemento da célula unitária tipo abertura ou *slot*, e tipo condutor ou *patch* [10]. Na FSS do tipo abertura, a célula unitária é uma camada metalizada e o seu elemento básico é uma abertura. Neste caso a FSS se comporta como um circuito LC em paralelo, com características de um filtro passa-faixa, ou seja, quando os elementos impressos entram em ressonância, a FSS se torna praticamente “transparente” deixando passar a onda incidente, Figura 9 [29].

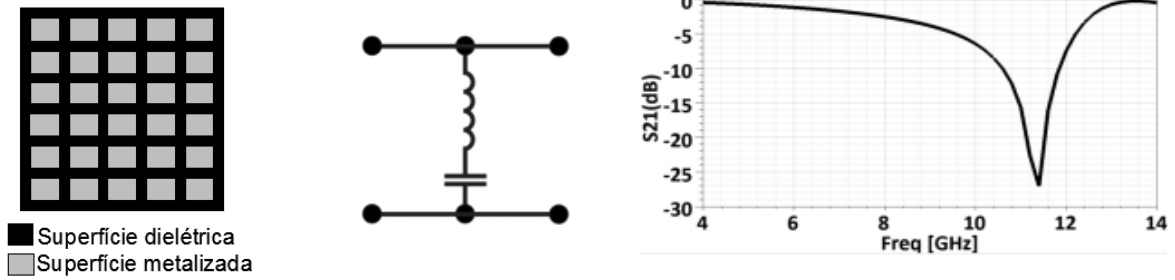
Figura 9 - FSS do tipo abertura



Fonte: [15]

Para as FSS do tipo *patch*, a célula unitária é uma camada dielétrica e o seu elemento básico uma superfície condutora, *patch* condutor. Neste caso a FSS se comporta como um filtro LC em série, de forma semelhante a um filtro rejeita-faixa, pois à medida que os elementos entram em ressonância, o arranjo irradia a potência incidente na direção de reflexão, até que na frequência de ressonância da estrutura, a FSS se comporta como um condutor perfeito refletindo praticamente toda a onda incidente, Figura 10.

Figura 10 - FSS do tipo *patch*



(a) FSS tipo *patch*

(b) Circuito equivalente

(c) Resposta em frequência

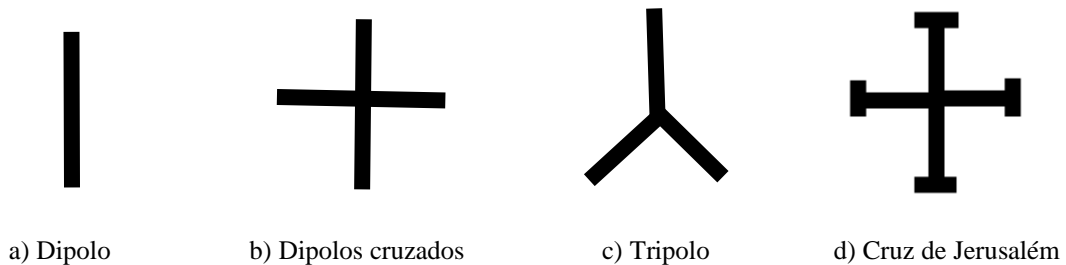
Fonte: [15]

2.1.1.2 Geometria do elemento básico

As FSS também podem ser classificadas de acordo com a geometria de seus elementos básicos, podendo ser divididos em quatro grupos principais, conforme descrito a seguir [10], [26]:

Grupo 1: formado pelos elementos do tipo N-polos conectados pelo centro, Figura 11. Exemplos: dipolo fino, dipolos cruzados, tripolo e a cruz de Jerusalém.

Figura 11 - Elementos do Grupo 1



a) Dipolo

b) Dipolos cruzados

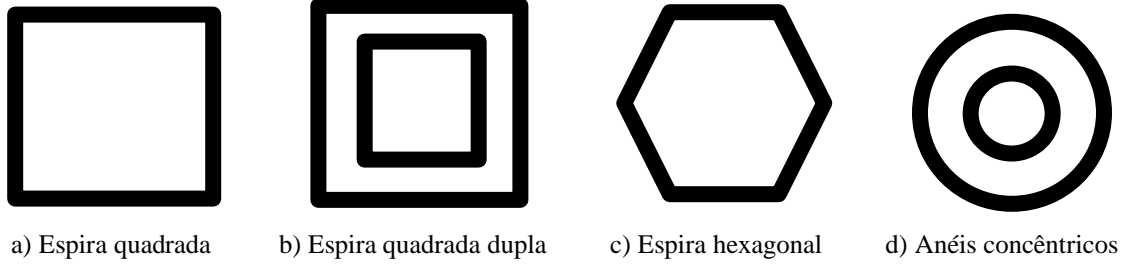
c) Tripolo

d) Cruz de Jerusalém

Fonte: Autoral

Grupo 2: formado pelos elementos do tipo espiras, Figura 12. Exemplos: espira quadrada, espira quadrada dupla, espira hexagonal e anéis circulares concêntricos.

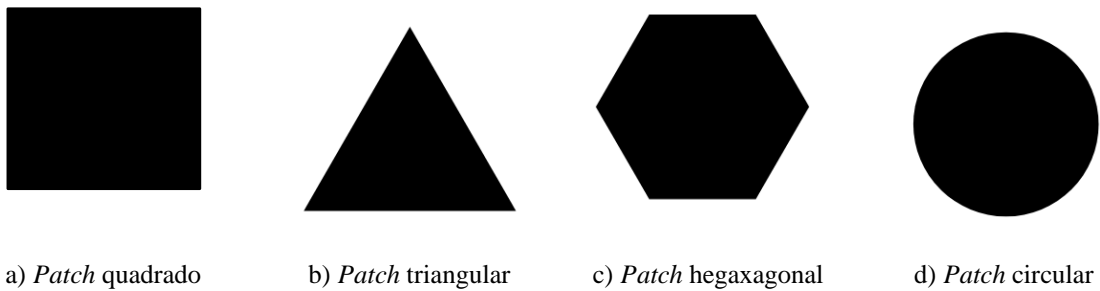
Figura 12 - Elementos do Grupo 2



Fonte: Autoral

Grupo 3: reúne os elementos de interior sólido, Figura 13. Exemplos: *patches* quadrados, triângulos, hexágonos, circulares e outros.

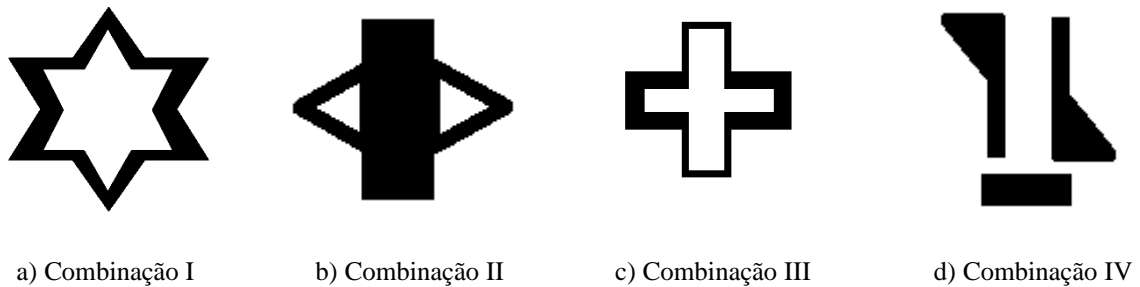
Figura 13 - Elementos do Grupo 3



Fonte: Autoral

Grupo 4: reúne os elementos composto a partir da combinações de dois ou três elementos pertencentes aos outros grupos anteriores, Figura 14.

Figura 14 - Elementos do Grupo 4

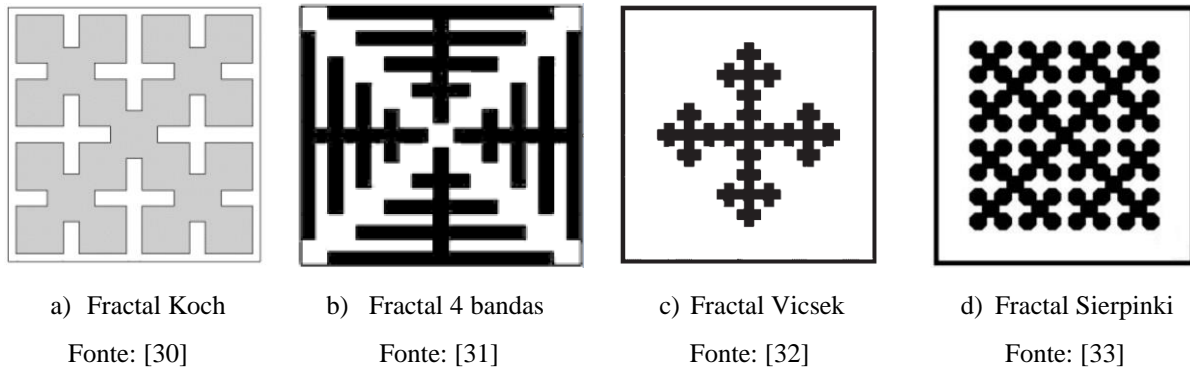


Fonte: Autoral

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

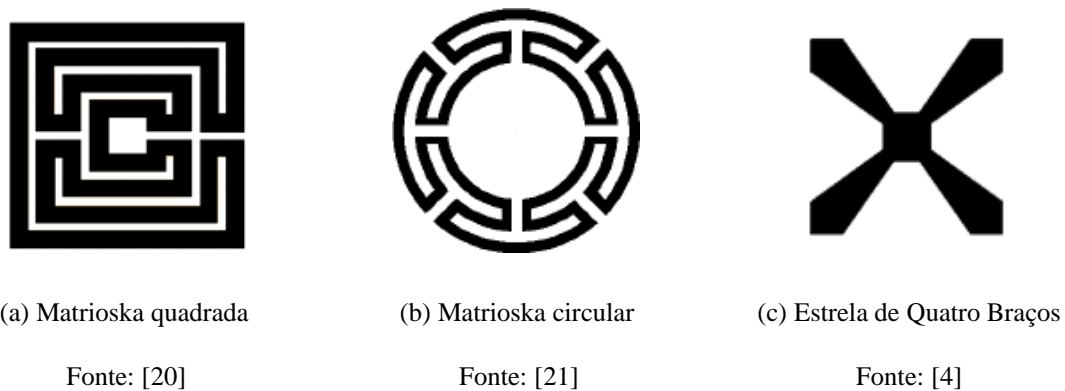
Vicsek, fractal Sierpinski, entre outros.

Figura 15 - 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 matrioska, Figura 16 (a) e (b) [12], [13], e a estrela de quatro braços [4], [14].

Figura 16 - Geometrias investigadas no GTEMA-IFPB

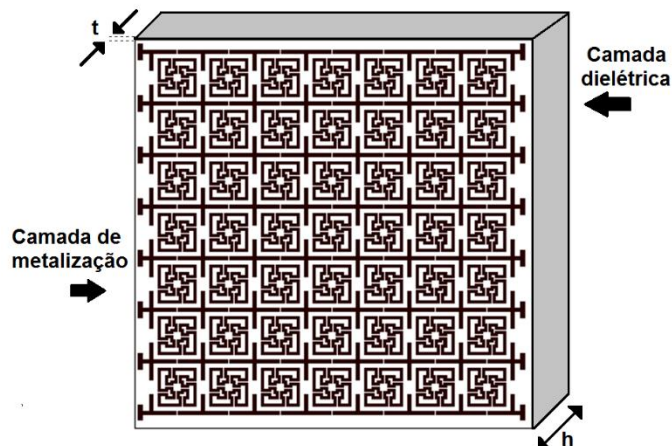


2.1.1.3 Espessura da camada de metalização

As FSS também possuem uma classificação de acordo com a espessura de sua camada de metalização t , Figura 17, podendo ser do tipo anteparo fino ou anteparo espesso. As FSS do tipo anteparo fino são aquelas que possuem uma camada de metalização de espessura menor que $0,001\lambda_0$, onde λ_0 é o comprimento de onda no espaço livre para a frequência de

ressonância da FSS. A vantagem da utilização de FSS de anteparo fino é o baixo custo de fabricação, pois podem ser fabricadas por técnicas de circuito impresso [28], [34].

Figura 17 - FSS de anteparo fino



Fonte: Autoral

As FSS de anteparo espesso possuem uma camada de metalização mais espessa, Figura 18. Entre as vantagens das FSS de anteparo espesso, está a transição mais rápida da banda passante para a banda de rejeição, *roll-off*. No entanto, esse tipo de FSS apresenta como desvantagens custos mais elevados, peso maior e processo de fabricação mais complexo, quando comparado à FSS de anteparo fino [35], [36].

Figura 18 - FSS do tipo anteparo espesso

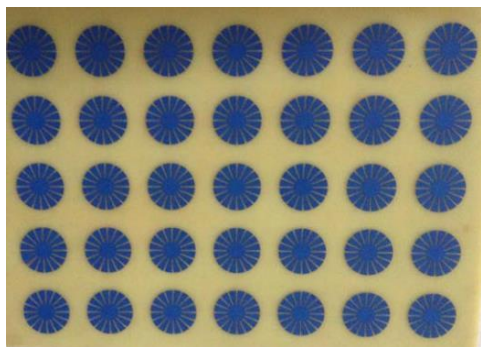


Fonte:[37]

2.1.1.4 FSS passivas e FSS reconfiguráveis

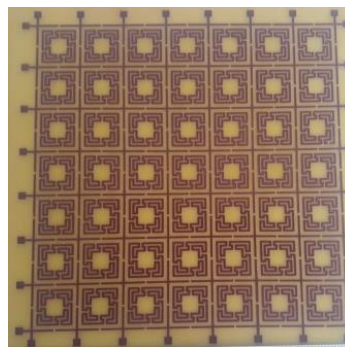
As FSS também podem ser classificadas quanto à reconfiguração do seu arranjo, podendo ser passivas, ou simplesmente FSS, ou reconfiguráveis. As FSS passivas apresentam uma resposta em frequência fixa e têm como vantagens as facilidades de projeto e fabricação, Figura 19 [10].

Figura 19 - Exemplos de FSS passivas



a) FSS circular tipo fractal com elementos *patch*

Fonte: [38]

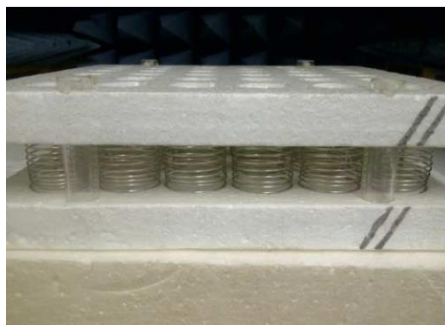


b) FSS passiva associando as geometrias dipolos cruzados e matrioska

Fonte: [24]

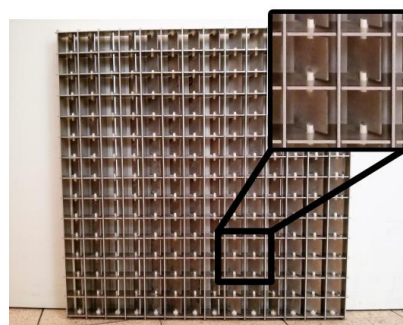
As propriedades das FSS reconfiguráveis, como frequência de ressonância e polarização, podem ser alteradas em tempo real, podendo essa modificação ser tanto mecânica, como eletrônica. Na reconfiguração mecânica, Figura 20, são exploradas modificações mecânicas, como esticar, dobrar ou girar o elemento básico para obter o ajuste da resposta em frequência [39].

Figura 20 - FSS reconfiguráveis mecanicamente



a) FSS reconfigurável usando ressonador de mola

Fonte: [39]

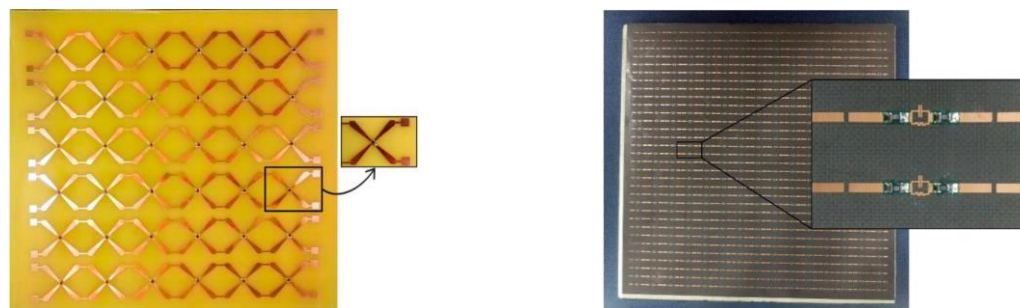


b) FSS 3D mecanicamente ajustável

Fonte: [27]

Por outro lado, na reconfiguração eletrônica, Figura 21, componentes ativos, como varactores [14], diodos PIN [40] ou chaves MEMS [41], são incorporados na geometria básica da FSS.

Figura 21 - FSS reconfiguráveis eletronicamente



a) FSS reconfigurável com geometria estrela de quatro braços usando diodo PIN

Fonte: [4]

b) FSS reconfigurável com base na ressonância paralela

Fonte: [42]

Em ambos os casos, a variação da resposta em frequência pode ocorrer de maneira discreta, ou contínua, dependendo da técnica de reconfiguração empregada [10].

2.1.2 Aplicações das FSS

Diversas aplicações utilizam FSS, desde a faixa de micro-ondas até a faixa de terahertz, sendo essas tanto para fins científicos, como em antenas para radioastronomia, telecomunicações, fins civis e militares.

Uma das aplicações mais conhecidas das FSS é o anteparo da porta do forno de micro-ondas, Figura 22, que funciona como um filtro, permitindo passar a faixa de frequência da luz visível e rejeitando a faixa de micro-ondas [6].

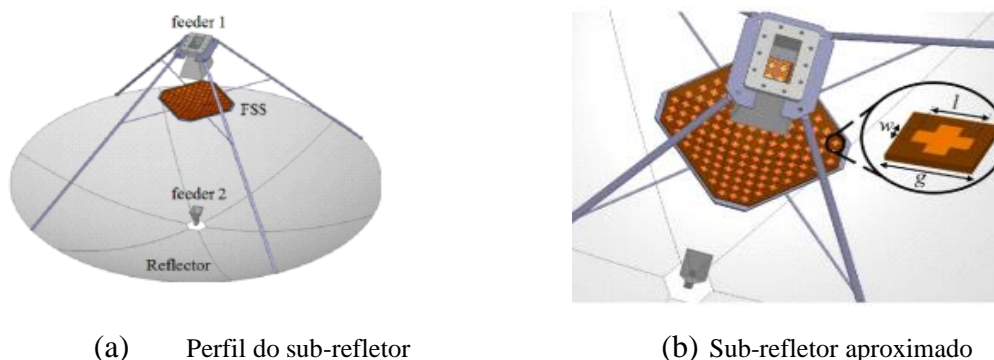
Figura 22 - Anteparo do forno micro-ondas



Fonte:[43]

Outra aplicação são as antenas de banda dupla onde a FSS é utilizada como sub-refletor. Na Figura 23, é ilustrado um sistema de antena do tipo banda dupla, apresentando o alimentador 2 (*feeder 2*) colocado no ponto focal do refletor principal, enquanto que o alimentador 1 (*feeder 1*) é colocado no ponto focal do sub-refletor, que é formado por uma FSS. Esse anteparo é projetado para refletir a faixa de frequência oriunda do alimentador 1, mas é totalmente transparente para a faixa de frequência do alimentador 2, com apenas um único refletor é possível operar em duas frequências distintas [44].

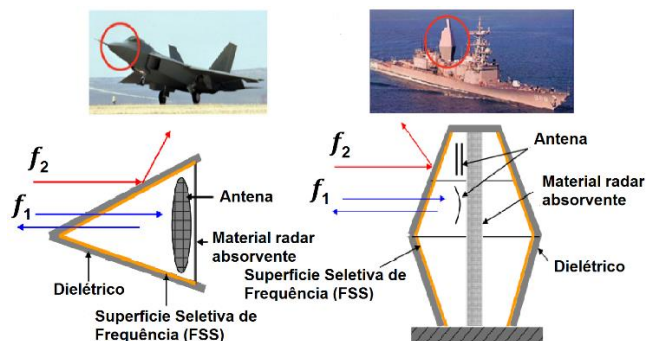
Figura 23 - Antena de banda dupla com sub-refletor usando FSS



Fonte: [44]

O radome é mais uma das aplicações em que as FSS podem ser utilizadas. Neste caso os radomes são usados para proteger o sistema de antenas de agentes atmosféricos como ventos, chuva, neve e granizo. A presença de um radome na região de campo próximo de uma antena produz uma distorção do padrão de radiação e com o uso de FSS em tais radomes, Figura 24, é possível minimizar essa degradação de sinal [45].

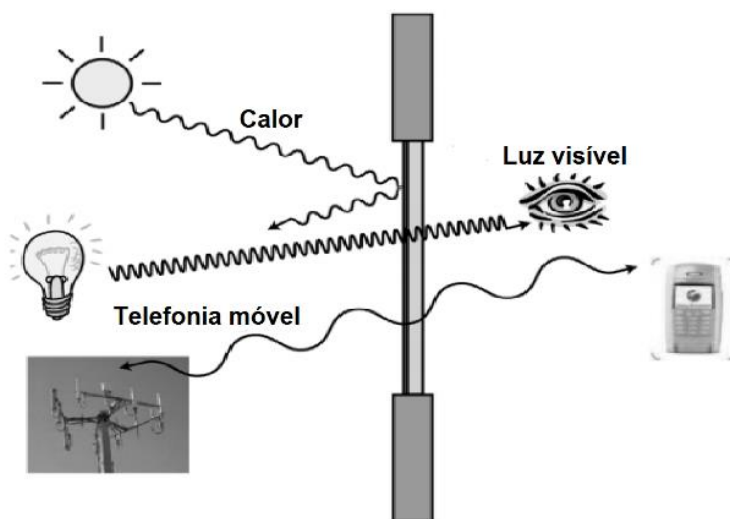
Figura 24 - Radome utilizando FSS



Fonte:[46]

As FSS são ainda utilizadas no revestimento de paredes e janelas em casas e prédios para uma maior eficiência energética ou privacidade de dados. A FSS de uma janela eficiente, Figura 25, atua como um filtro, bloqueando a radiação eletromagnética na região do infravermelho, impedindo a transferência de calor do ambiente externo para o interno e vice-versa, assim mantendo o calor no inverno e impedindo-o de entrar no verão. A FSS é transparente tanto no espectro visível, quanto nas comunicações móveis, não aparecendo como um ponto estético, nem sendo um obstáculo para os sinais de telefonia móvel e Internet [47].

Figura 25 - Aplicação de FSS com janela inteligente



Fonte:[47]

2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE

O projeto de uma FSS envolve geralmente três etapas: projeto inicial, caracterização numérica, caracterização experimental. Em todas as etapas são realizadas otimizações do processo para atingir os melhores resultados.

O projeto inicial é realizado 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.

Posteriormente é feita a caracterização numérica, verificando se as especificações desejadas foram alcançadas ou não. Caso não tenham sido atingidas, o projeto é aprimorado numericamente até que sejam obtidos os resultados esperados.

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

2.2.1– Caracterização numérica

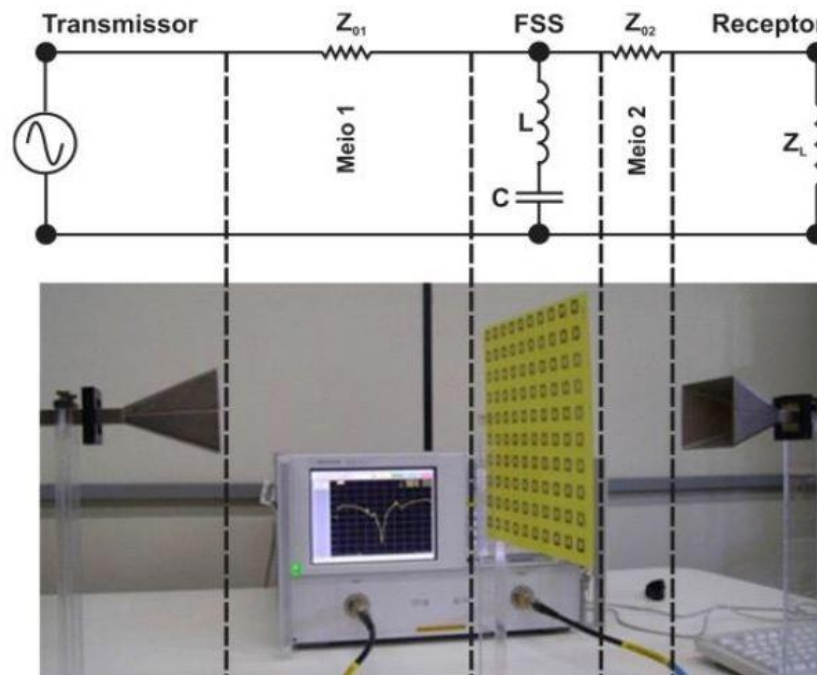
Várias técnicas numéricas têm sido usadas nas análises das FSS. Fórmulas aproximadas e simples foram desenvolvidas por alguns autores, capazes de determinar os parâmetros de transmissão e reflexão da FSS. Este tipo de análise diminui o tempo computacional e produz resultados satisfatórios para estruturas mais simples. Porém, a complexidade da geometria e a determinação de soluções para os modos de ordem superior são fatores limitantes para esse tipo de análise, o que pode produzir resultados imprecisos [29], [48].

Outro método utilizado é o método do circuito equivalente. Nesse método um circuito LC (indutor e capacitor), Figura 26, é utilizado para representar a resposta em frequência da FSS. No entanto, para geometrias mais complexas, ou modos de ordem superior, esse método torna-se inviável [49].

Com o aumento da disponibilidade de recursos computacionais, foi possível implementar métodos numéricos, mais eficientes e com resultados mais confiáveis, tais como:

- Método dos Momentos (*Method of Moments - MoM*) [50], [51];
- Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Difference Time Domain - FDTD*) [52], [53];
- Método dos Elementos Finitos (*Finite-Element Method - FEM*) [53], [54];
- Método Iterativo das Ondas (*Wave Concept Iterative Procedure - WCIP*) [55], [56];

Figura 26 - Análise da FSS através de um circuito elétrico equivalente



Fonte:[15]

As simulações desse trabalho foram realizadas utilizando o *software* comercial ANSYS Electronics Desktop, módulo HFSS, em que foram analisadas a combinação das geometrias matrioska com os dipolos cruzados. Nas simulações foram considerados os casos limites ideais, modos ligado e desligado, bem como foi atribuída uma resistência variável, R , que foi parametrizada a fim de obter uma análise mais aproximada da realidade, considerando assim a influência do diodo PIN.

Dessa forma, para fazer a representação do diodo PIN, foram feitas fendas de 1 mm de largura, às quais foram associadas uma superfície resistiva (*Boundary RLC*, no programa ANSYS HFSS), Figura 27. Variando o valor da resistência é possível simular os diferentes estados do diodo PIN. Para inclusão do indutor, foi realizado o mesmo procedimento nas fendas horizontais dos dipolos cruzados.

Figura 27 - Janela do *boundary* RLC

The image shows a software dialog box titled "Lumped RLC Boundary". It has two tabs: "General" and "Defaults". The "Name" field contains "LumpRLC1". Below this is a section titled "Parallel R, L, C Values" containing three rows: "Resistance" (checked, value 1000, unit ohm), "Inductance" (unchecked, value 0, unit nH), and "Capacitance" (unchecked, value cap, unit dropdown). Below this section is a "Current Flow Line" dropdown menu set to "Defined". At the bottom of the dialog are three buttons: "Use Defaults", "OK", and "Cancelar".

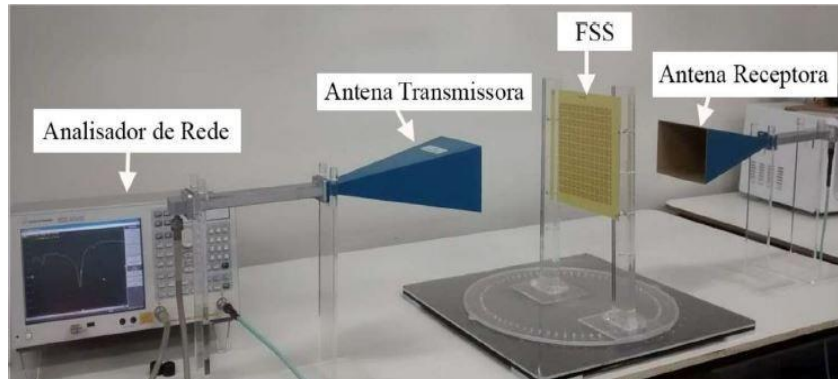
Fonte: Autoral

2.2.2– Caracterização experimental

Após feita a caracterização numérica, as FSS são fabricadas e caracterizadas experimentalmente, sendo possível medir suas propriedades de transmissão e reflexão e assim validar os resultados obtidos numericamente.

Uma das configurações de medição mais utilizadas é da Figura 28, com antenas diretivas, neste caso do tipo corneta. A FSS é posicionada entre as antenas (receptora e transmissora) que são conectadas a um analisador de redes. A onda eletromagnética emitida incide sobre a FSS, que reflete ou deixa passar parte da potência incidente, de acordo com os parâmetros da FSS em teste. A potência transmitida, que atravessa a FSS, é captada pela antena receptora e assim é possível caracterizar a resposta em frequência da estrutura. A medição na polarização x é obtida rotacionando a FSS em 90° da posição em que foi medida a polarização y [4], [26].

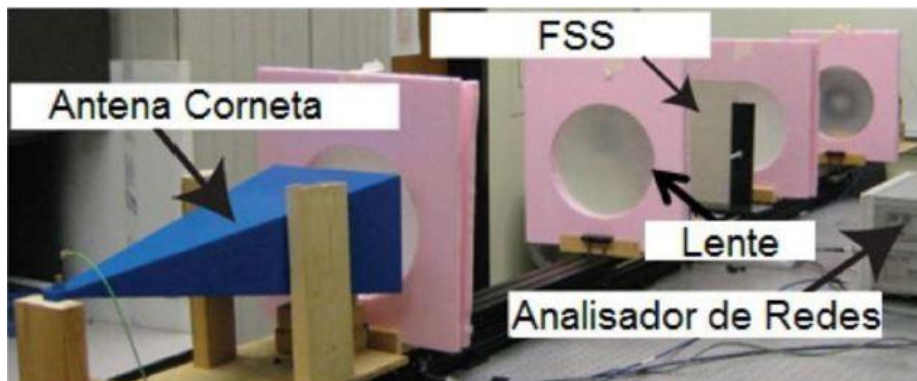
Figura 28 - Configuração para caracterização experimental da FSS com antenas cornetas



Fonte:[4]

Considerando o tamanho da FSS em relação ao comprimento de onda, imprecisões nos dados podem ocorrer devido às reflexões nas paredes e objetos da sala ou difrações nas bordas da FSS. Para medições mais precisas, adicionam-se lentes entre a antena e a FSS, o que diminui o efeito de difração, pois as lentes dielétricas transformam a onda esférica das cornetas em um feixe colimado de ondas planas, Figura 29 [24], [29].

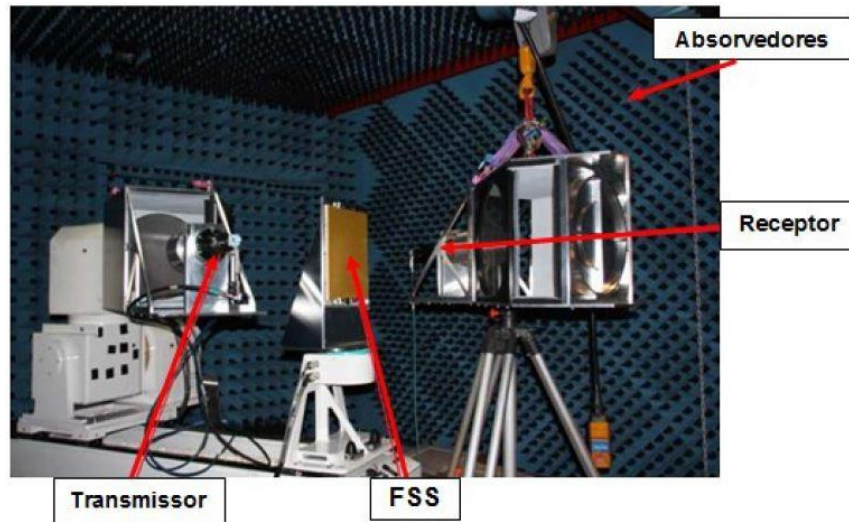
Figura 29 - Configuração para caracterização experimental da FSS com antenas cornetas e lentes.



Fonte: [57]

Medições mais precisas podem ser realizadas com a utilização de painéis absorvedores, tais como os presentes em câmaras anecóicas, Figura 30, que garantem um ambiente praticamente livre de interferências [58].

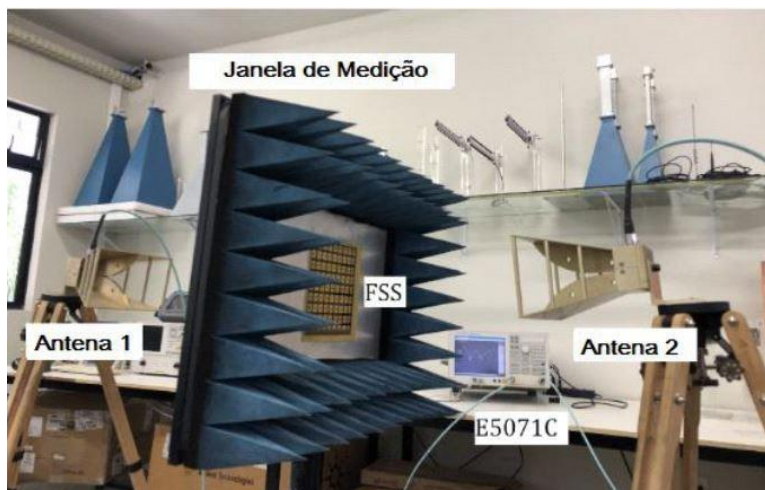
Figura 30 - Configuração para caracterização experimental da FSS em câmara anecóica



Fonte: [58]

Outra possibilidade é a utilização de uma janela de medição, Figura 31, na qual uma superfície condutora é limitada por absorvedores, sendo que nessa superfície é deixada uma janela para que nela seja colocada a FSS a ser caracterizada.

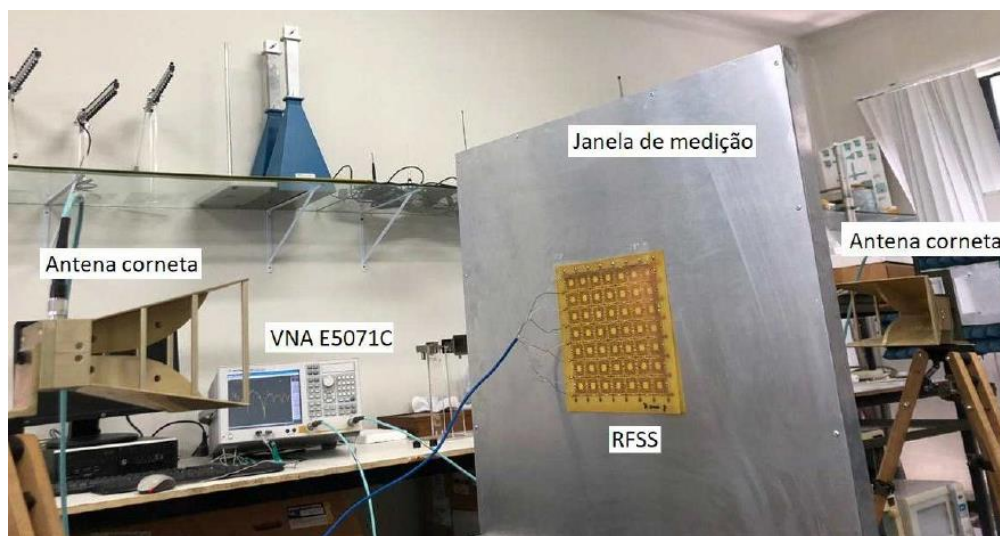
Figura 31 - Configuração para caracterização experimental da FSS com janela de medição com absorvedores.



Fonte: [24]

A configuração utilizada nesta dissertação para caracterização experimental, foi a janela de medição sem os absorvedores, Figura 32. Pois, o coeficiente de reflexão não é medido na pesquisa. Um estudo futuro poderia analisar as diferenças provocadas na medição da FSS, com e sem a utilização dos absorvedores na janela de medição.

Figura 32 - Configuração para caracterização experimental da FSS com janela de medição sem absorvedores



Fonte: Autoral

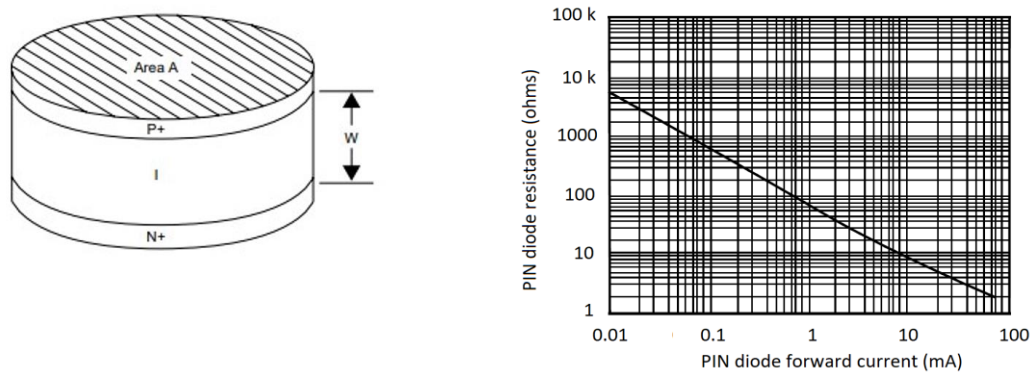
2.3 DIODOS PIN

As FSS reconfiguráveis eletronicamente precisam de dispositivos que alterem as suas características (geometria, dielétrico etc.) e, conseqüentemente, a sua resposta em frequência. Um desses dispositivos é o diodo PIN, que será descrito nesta Seção, pois foi utilizado nesta dissertação [59], [60].

O diodo PIN se comporta nas faixas de RF e micro-ondas como um resistor controlado por corrente, sendo o mesmo um semicondutor de silício constituído de uma camada de material intrínseco de alta resistividade, de área e espessura finitas, contida entre camadas altamente dopadas de materiais tipo P e N, como podem ser observados na Figura 33 (a), assim como a sua curva típica de resistência em função da corrente. Em geral, dois pontos de operação do diodo PIN são considerados, a polarização direta (baixa impedância) Figura 33 (b). e a polarização reversa (alta impedância), Figura 33 (c) [59],[60]. Entretanto,

um modelo simplificado, Figura 33 (d) pode ser utilizado.

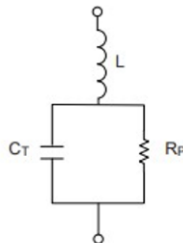
Figura 33 - Modelo básico para o diodo PIN



a) Estrutura do diodo PIN e curva típica de resistência em função da corrente



b) Polarização direta



c) Polarização reversa ou zero volt



d) Modelo simplificado

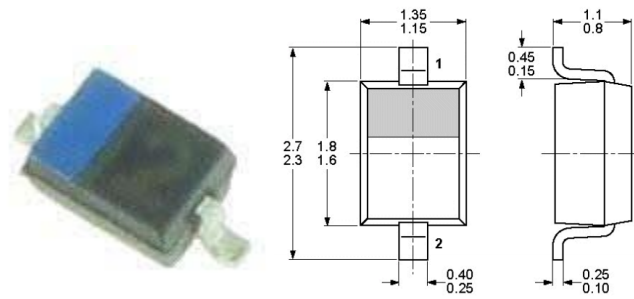
Fonte: [59]

Os principais parâmetros que definem um diodo PIN são:

- R_S - Resistência em série quando diretamente polarizado;
- C_T - Capacitância total a 0 V ou reversamente polarizado;
- R_P - Resistência em paralelo quando em 0 V ou polarizado reversamente;
- V_R - Máxima tensão DC permissível para polarização reversa;
- τ - Tempo de vida dos portadores.

Nesta dissertação foi utilizado o diodo PIN modelo BAR 64-03W fabricado por Infineon Technologies, Figura 34.

Figura 34 - Diodo PIN BAR 64-03 W.



Fonte: [59]

Algumas de suas características são [59]:

- Máxima corrente direta: 100 mA;
- Máxima tensão reversa de 150 V;
- Máxima capacitância de 0,35 pF para uma tensão reversa de 20 V;
- Tensão direta de 1,1 V para uma corrente de 50 mA;
- Resistência de 1,35 Ω para uma corrente de 100 mA;
- Faixa de frequência de operação de 1 MHz a 6 GHz.

2.4 INDUTORES

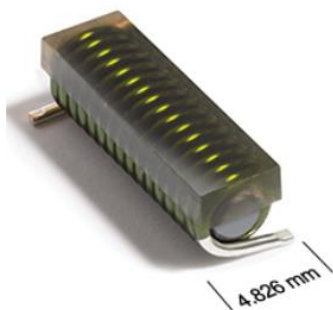
O indutor consiste em uma bobina de fio condutor, sendo ele um elemento passivo projetado para armazenar energia em seu campo magnético. Os indutores têm inúmeras aplicações em eletrônica e sistemas de potência, e são usados em fontes de tensão, transformadores, rádios, TVs, radares e motores elétricos. Em radiofrequência (RF), por exemplo, o indutor é necessário para controle e ajuste na frequência de operação, casamento de impedâncias, filtragem, seletividade de sinais etc [61].

A indutância é a propriedade segundo a qual um indutor se opõe à variação do fluxo de corrente através dele. Além de sua indutância, em aplicações para RF e micro-ondas

parâmetros como resistência DC (DCR), fator de qualidade (Q) e frequência auto-ressonante (SRF) são parâmetros de desempenho que podem ter mais relevância [62].

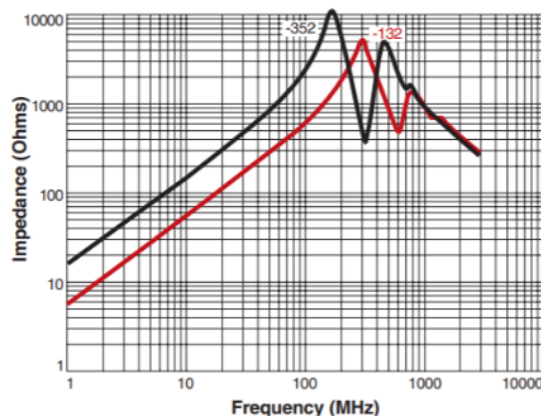
Neste trabalho, um indutor para RF fixo 4310LC-132KEB, com $1,3 \mu\text{H}$ [63] foi empregado, Figura 35. A Figura 36 exibe o gráfico com relação entre impedância e a frequência do indutor para RF, a linha vermelha mostra o comportamento do modelo utilizado.

Figura 35 - Indutor para RF fixo 4310LC-132KEB



Fonte: [62]

Figura 36 - Impedância \times Frequência do Indutor para RF fixo 4310LC-132KEB



Fonte: [62]

Algumas de suas características são [63]:

- Máxima corrente contínua: 4.2 A;
- Máxima resistência CC: 150 m Ω ;
- Frequência auto-ressonante: 235 MHz

CAPÍTULO 3

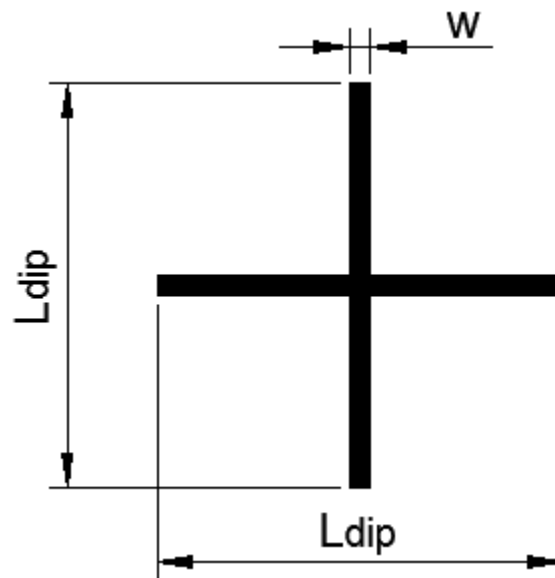
3 DESCRIÇÃO DO PROJETO

Neste Capítulo são descritos os procedimentos de projeto das FSS reconfiguráveis. A resposta em frequência de cada geometria é analisada separadamente, assim como das geometrias associadas. Em seguida é analisado o efeito da inclusão do diodo PIN nas linhas verticais e o curto-circuito nas linhas horizontais. Por último, é retirado o curto-circuito e inserido o indutor para RF, na FSS reconfigurável.

3.1– GEOMETRIA DIPOLOS CRUZADOS

A geometria dipolos cruzados utilizada na dissertação é bastante simples, para a qual a frequência de ressonância ocorre quando o comprimento do dipolo, L_{dip} , equivale a aproximadamente metade do comprimento de onda guiado [10], [26], Figura 37. É uma estrutura do tipo *patch*, apresentando características de um filtro rejeita-faixa.

Figura 37 - Geometria dipolos cruzados.



Fonte: Autoral

Para o cálculo das dimensões do dipolo, são utilizadas as seguintes equações [24]:

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

Sendo f_{res} a frequência de ressonância do dipolo. A constante dielétrica efetiva, $\epsilon_{ref-dip}$, é calculada por:

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

Sendo:

ϵ_{ref-MS} – Constante dielétrica efetiva para uma microfita de largura igual à largura do dipolo, w , e espessura do dielétrico h .

$\epsilon_{ref-CPW}$ - Constante dielétrica efetiva para uma guia de ondas coplanar (CPW) sem plano terra, onde a largura da fita central é igual à largura do dipolo w e o espaçamento entre a fita central e os planos coplanares é $10h$.

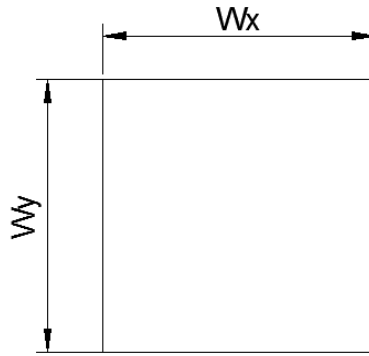
ϵ_{ref-MP} e $\epsilon_{ref-CPW}$ são obtidos utilizando aplicativos como o AppCAD [64].

3.2– GEOMETRIA MATRIOSKA INDEPENDENTE DE POLARIZAÇÃO

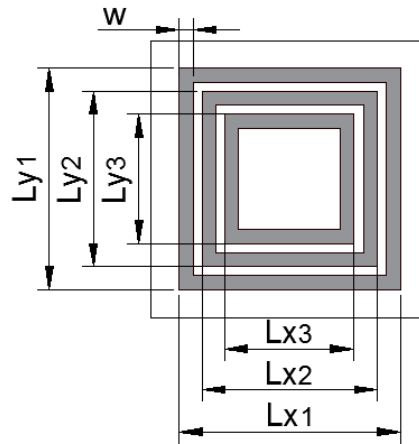
A geometria matrioska utilizada nesta dissertação é uma variação das utilizadas em [21], [24] exibindo as vantagens de tamanho reduzido e operação de multibanda, além da independência da polarização. Para obtenção da geometria matrioska, inicialmente são estabelecidas as dimensões da célula unitária, Figura 38 (a), o que também determina a periodicidade da FSS. Essa periodicidade é relacionada ao fator de preenchimento e às limitações dos modos de grade.

Em seguida, anéis metálicos quadrados concêntricos são introduzidos, como ilustrado na Figura 38 (b). Fendas são inseridas nos mesmos pontos entre anéis consecutivos, Figura 38 (c) e em seguida os anéis são interligados, Figura 38 (d), obtendo-se a geometria matrioska independente de polarização.

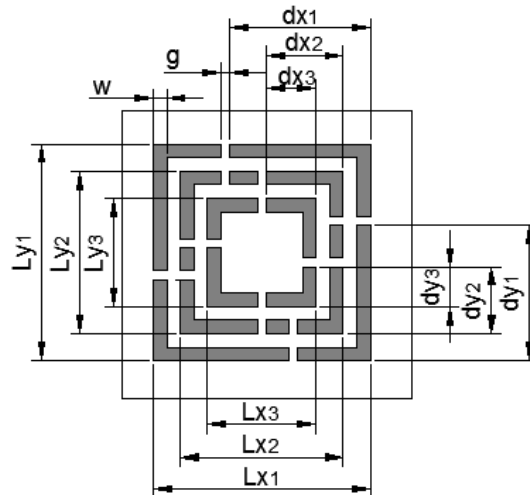
Figura 38 - Obtenção da geometria matrioska independente de polarização



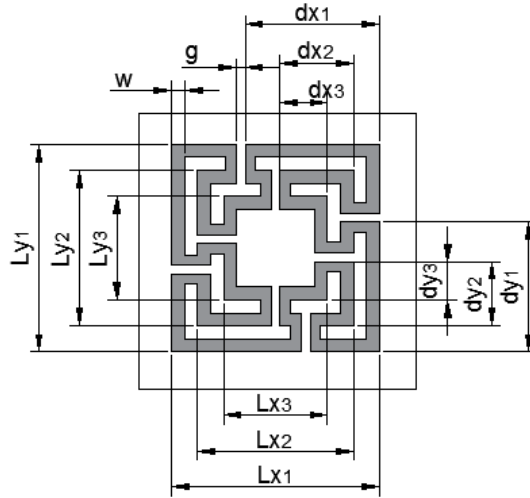
a) Célula unitária



b) Célula unitária com anéis metálicos concêntricos



c) Célula unitária com anéis metálicos com fendas



d) Geometria matrioska independente de polarização

Fonte: Autoral

A geometria apresentada na Figura 38 é contínua e assim sendo, o seu comprimento efetivo é maior que o perímetro da geometria mais externa ($2Lx1 + 2Ly1$). Geralmente, as dimensões ao longo de x e y são iguais e $Lxi = Lyi = Li$, $dxi = dyi = di$, $i = 1, 2, 3$.

A determinação das dimensões da geometria matrioska é um processo que, em geral, requer uma otimização numérica, a partir de valores iniciais. Dessa forma, as equações (3) e (4) [21], [24], são úteis para estimar as primeiras frequências de ressonância da geometria matrioska.

$$f_{res1} = \frac{3 \times 10^8}{L_{ef1} \sqrt{\epsilon_{ref-CPW}}} \quad (3)$$

$$f_{res2} = \frac{3 \times 10^8}{\left(\frac{L_{ef2}}{2}\right) \sqrt{\epsilon_{ref-CPW}}} \quad (4)$$

Onde: L_{ef1} e L_{ef2} são os comprimentos efetivos da primeira e segunda ressonância, respectivamente, dados por:

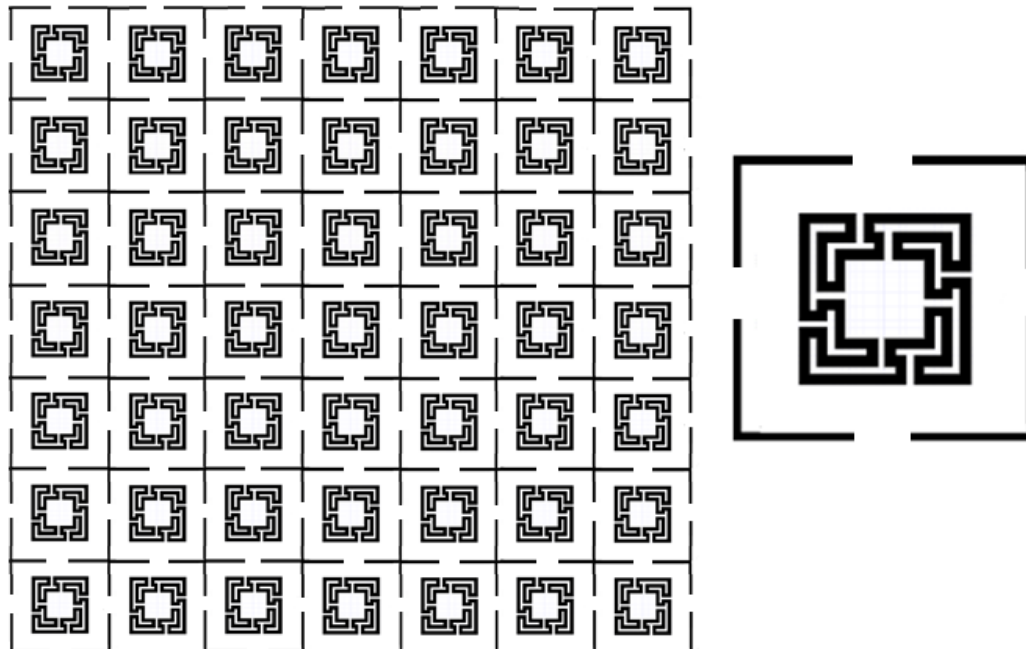
$$L_{ef1} = 3(L_1 - 2w) + 2(L_2 - 2w) + 3(L_3 - 2w) \quad (5)$$

$$L_{ef2} = 3L_1 + 2L_2 + 3L_3 \quad (6)$$

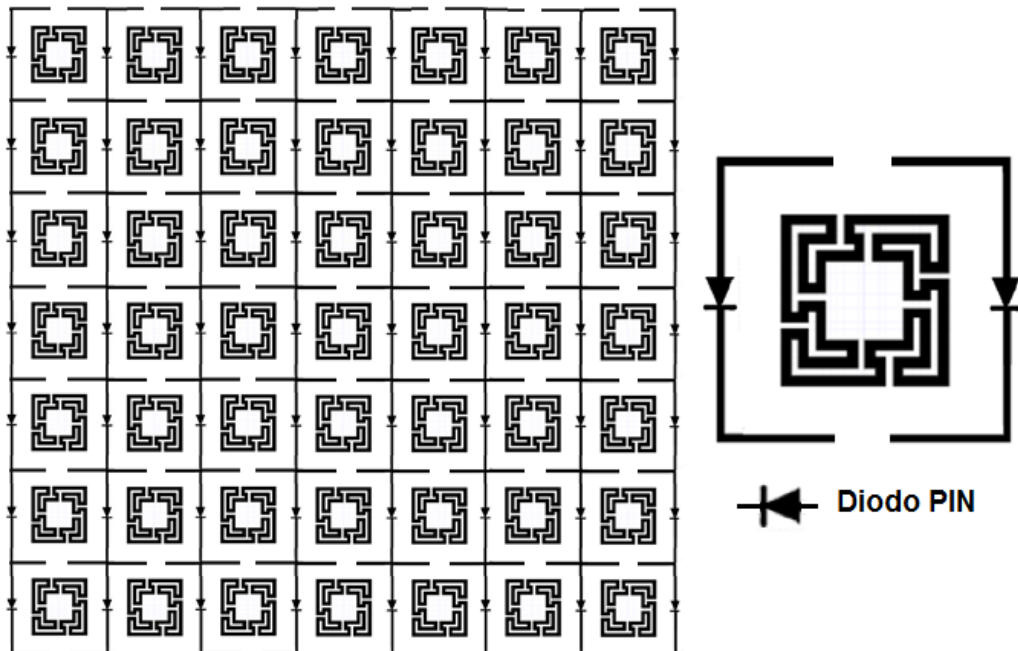
3.3- FSS RECONFIGURÁVEL COM AS GEOMETRIAS ASSOCIADAS

A Figura 39 exibe o processo de obtenção da FSS reconfigurável proposta. Na Figura 39 (a) observa-se a associação das geometrias os dipolos cruzados e matrioska. Posteriormente foram adicionados os diodos PIN nos braços verticais da FSS, tornando a frequência referente a geometria dipolo cruzado reconfigurável, Figura 39 (b). Depois os braços horizontais foram curtos-circuitos Figura 39 (c), para manter a polarização na direção x, o curto-circuito foi retirado e substituído pelo indutor para RF Figura 39 (d).

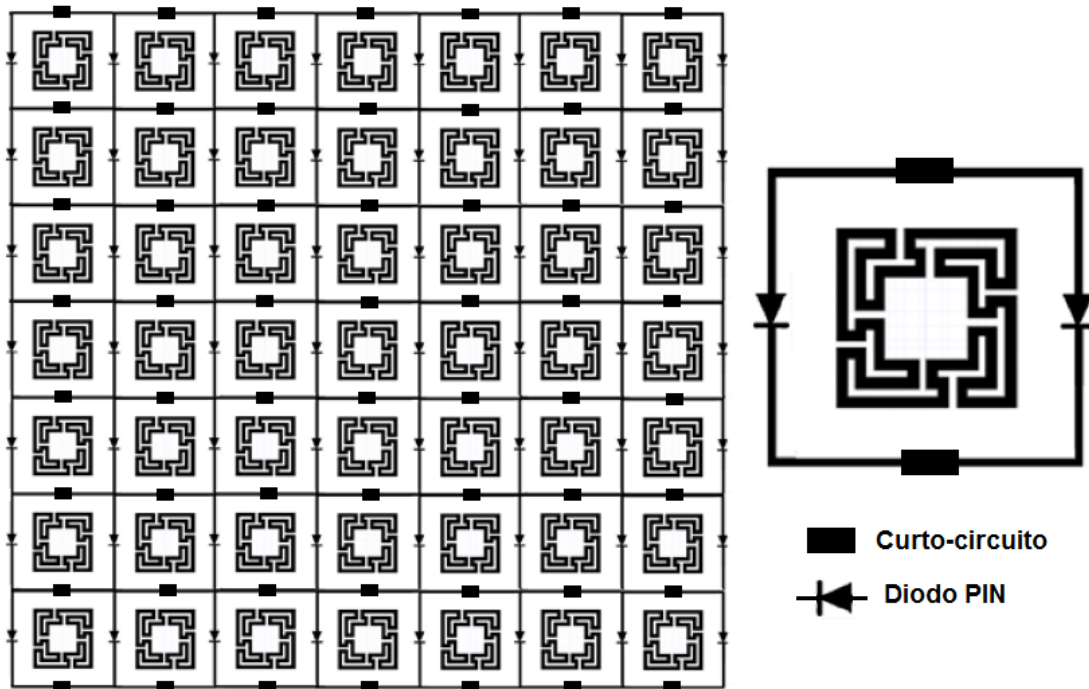
Figura 39 - Obtenção da FSS reconfigurável



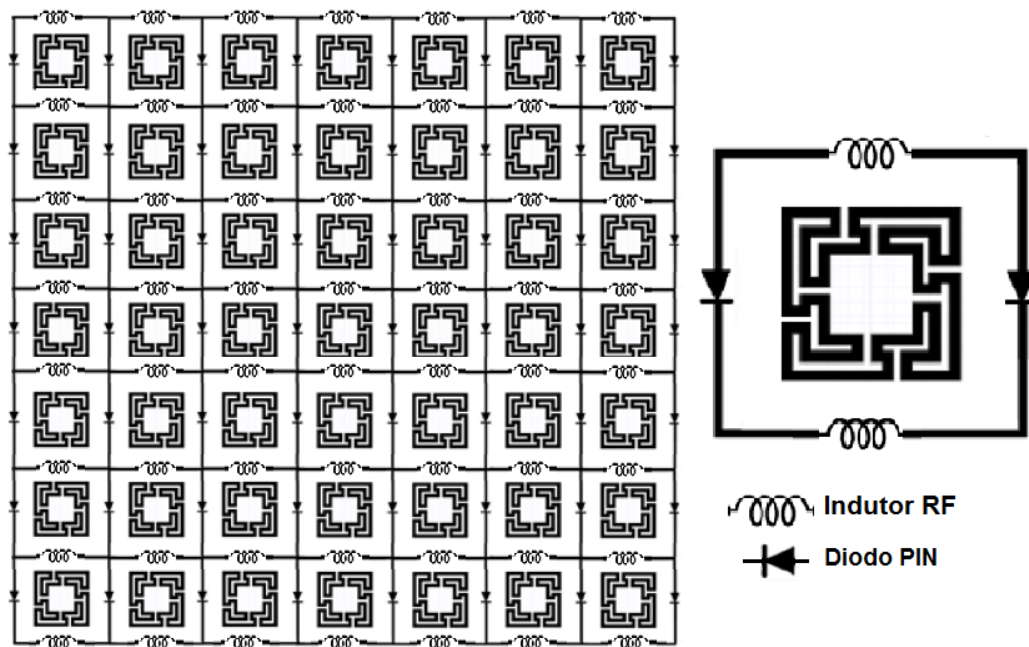
a) Associação das geometrias matrioska e dipolos cruzados



b) FSS reconfigurável com as geometrias associadas e os diodos PIN



c) FSS reconfigurável com as geometrias associadas com os diodos PIN e curto-circuito



d) FSS reconfigurável com as geometrias associadas com os diodos PIN e indutor para RF

Fonte: Autoral

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados os resultados numéricos e experimentais da FSS reconfigurável. Inicialmente são analisados os resultados numéricos da resposta em frequência para a geometria dipolos cruzados e matrioska, individualmente. Em seguida, são obtidas as respostas em frequência da FSS associando as duas geometrias.

Ademais são analisadas as respostas em frequência com a inserção dos diodos PIN (ligado e desligado) nas linhas verticais e o curto-circuito nas linhas horizontais da FSS reconfigurável. Posteriormente, é verificado a resposta em frequência com a retirada do curto-circuito para a incorporação do indutor para RF, nas linhas horizontais da FSS.

Na sequência são apresentados os resultados experimentais e discutido o efeito do diodo PIN na reconfiguração da FSS, na polarização x e y . O objetivo principal é alcançar a reconfiguração para a polarização y , mas mantendo a ressonância dos dipolos cruzados para polarização x .

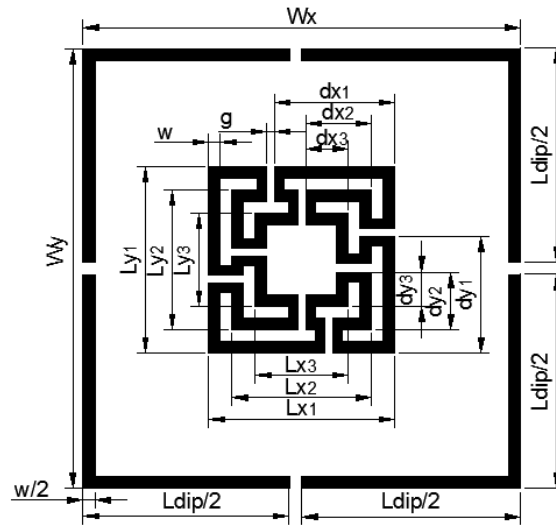
4.1 RESULTADOS NUMÉRICOS

Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o *software* comercial ANSYS *Electronics Desktop*, módulo HFSS. A FSS reconfigurável foi fabricada utilizando um substrato de FR-4 com constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$, com tangente de perdas $tg(\delta) = 0,02$ e espessura do substrato $h = 1,6 \text{ mm}$. As dimensões da célula unitária das geometrias utilizadas estão apresentadas na Tabela 1 e ilustradas na Figura 40.

Tabela 1 - Dimensões da célula unitária da FSS reconfigurável

Dimensão	Valor (mm)	Dimensão	Valor (mm)	Dimensão	Valor (mm)
W_x	30	G	1	d_1	15
W_y	30	L_1	24	d_2	8,5
L_{dip}	29	L_2	19	d_3	6
W	1,5	L_3	14	h	1,6

Figura 40 - Dimensões da célula unitária da FSS reconfigurável.

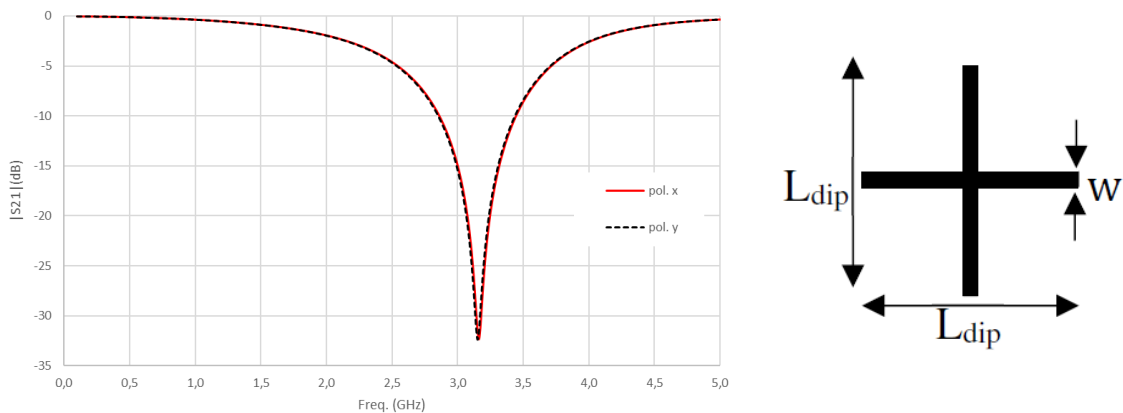


Fonte: Autoral

4.1.1 Resultados numéricos sem incluir os diodos PIN e os indutores para RF

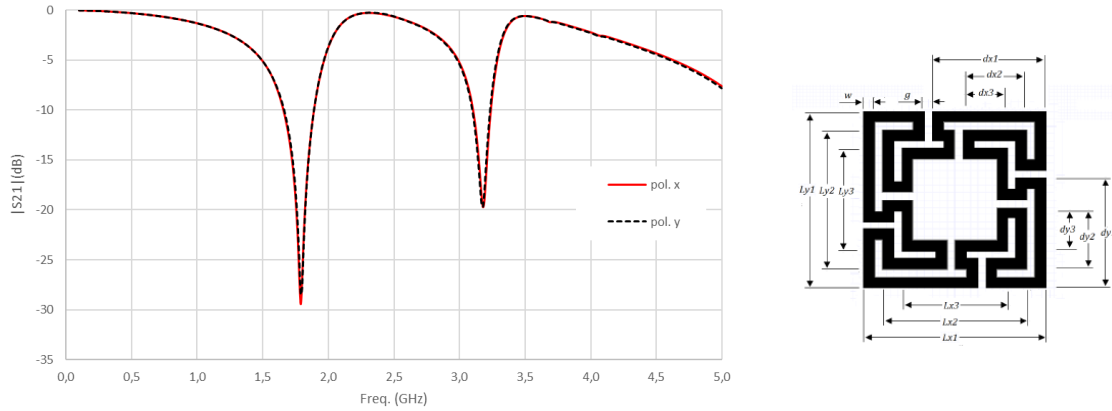
Inicialmente, são apresentados os resultados numéricos para as geometrias dipolos cruzados, Figura 40, e matrioska, Figura 41, de maneira isolada. Devido à simetria das geometrias, verifica-se que as respostas em frequência para as polarizações x e y são praticamente iguais.

Figura 41 - Resposta em frequência da geometria dipolos cruzados.



Fonte: Autoral

Figura 42 - Resposta em frequência da geometria matrioska



Fonte: Autoral

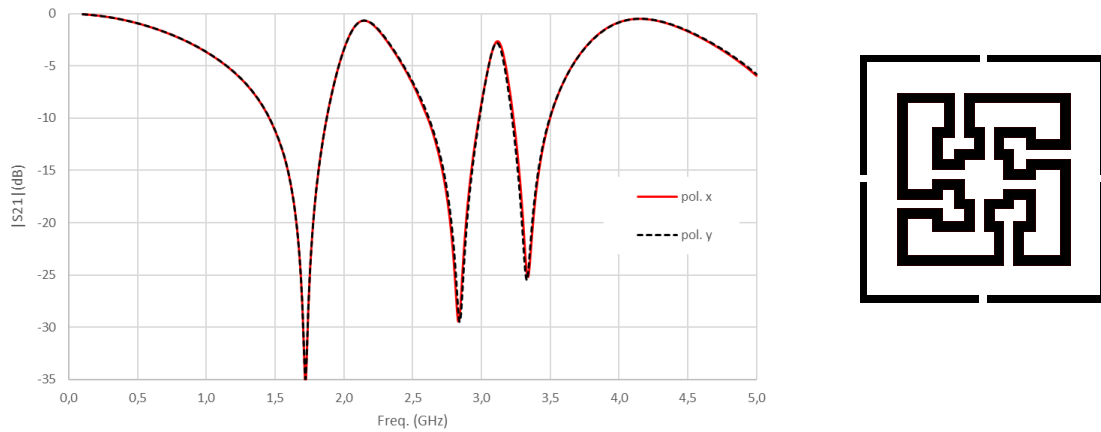
A Tabela 2 apresenta a comparação entre os valores numéricos (HFSS) e os calculados (Eqs. (1) – (6)), para as geometrias analisadas de maneira isolada. Quando comparados aos valores numéricos, os valores calculados apresentam uma boa concordância, confirmando que as equações propostas são adequadas para a obtenção dos valores iniciais das geometrias.

Tabela 2 - Frequências de ressonâncias – Geometrias isoladas

	Geometria	Numérico (ANSYS HFSS)	Calculado Eqs. (1) - (6)	Diferença (%)
f_{r1}	Matrioska	1,79 GHz	1,94 GHz	8,4%
f_{r2}	Dipolo	3,15 GHz	3,40 GHz	7,9%
f_{r3}	Matrioska	3,18 GHz	3,27 GHz	2,7%

Como apresentada na Figura 43, a resposta em frequência das geometrias associadas para as polarizações x e y . A primeira e a terceira frequências de ressonância são referentes à geometria matrioska e a segunda é referente à geometria dipolos cruzados. Na Tabela 3 são resumidos os resultados numéricos obtidos. Nota-se que ocorre um acoplamento entre a ressonância dos dipolos cruzados e a segunda ressonância da matrioska, provocando uma redução na ressonância do dipolo. Na Tabela 4 são apresentados os resultados numéricos para as geometrias isoladas e associadas.

Figura 43 - Resposta em frequência associando as geometrias matrioska e dipolos cruzados para polarizações x e y .



Fonte: Autoral

Tabela 3 - Frequências de ressonâncias – Geometrias associadas

	Geometria	Numérico (ANSYS HFSS)
f_{r1}	Matrioska	1,72 GHz
f_{r2}	Dipolo	2,85 GHz
f_{r3}	Matrioska	3,35 GHz

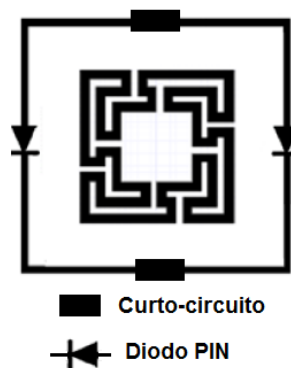
Tabela 4 - Frequências de ressonâncias – Resumo das geometrias associadas e isoladas

	Geometria	Numérico – geometrias isoladas (ANSYS HFSS)	Numérico – geometrias associadas (ANSYS HFSS)
f_{r1}	Matrioska	1,79 GHz	1,72 GHz
f_{r2}	Dipolo	3,15 GHz	2,85 GHz
f_{r3}	Matrioska	3,18 GHz	3,35 GHz

4.1.2 Resultados numéricos incluindo os diodos PIN e indutores para RF, polarização x

Com o propósito da reconfiguração, foram adicionados os diodos PIN nas fendas verticais e curtos-circuitos nas linhas horizontais da FSS, intitulada de RFSS01, Figura 45. Nas simulações numéricas, foi empregada a condição de contorno *Lumped RLC*, $R = 10 \text{ k}\Omega$ (diodo PIN OFF) e $R = 100 \text{ }\Omega$ (diodo PIN ON).

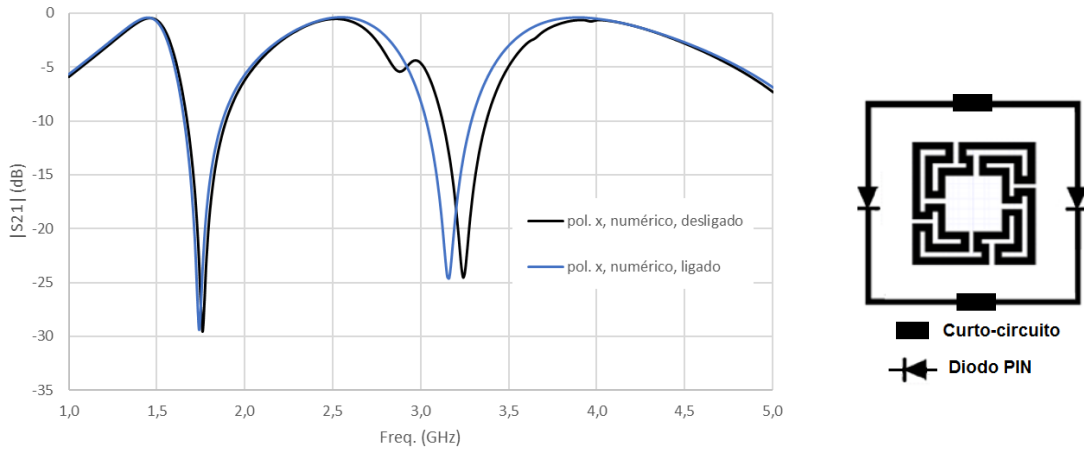
Figura 44 – Célula unitária da RFSS01



Fonte: Autoral

Na Figura 45 observam-se as duas frequências de ressonância referentes à geometria matrioska, a frequência de ressonância dos dipolos na polarização x é suprimida devido ao curto-circuito. Além disso a resposta em frequência praticamente não é afetada pelo estado do diodo PIN, ligado ou desligado.

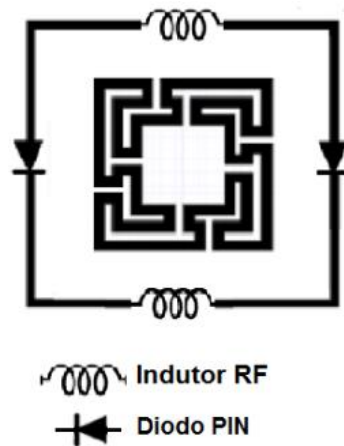
Figura 45 - Resposta em frequência da FSS reconfigurável com diodo PIN e curto-circuito, polarização x



Fonte: Autoral

Com o objetivo de manter as três frequências de ressonância na polarização x , os curtos-circuitos foram substituídos por indutores para RF com $L = 1,3 \mu\text{H}$, sendo essa FSS denominada RFSS02, Figura 46.

Figura 46 – Célula unitária da RFSS02

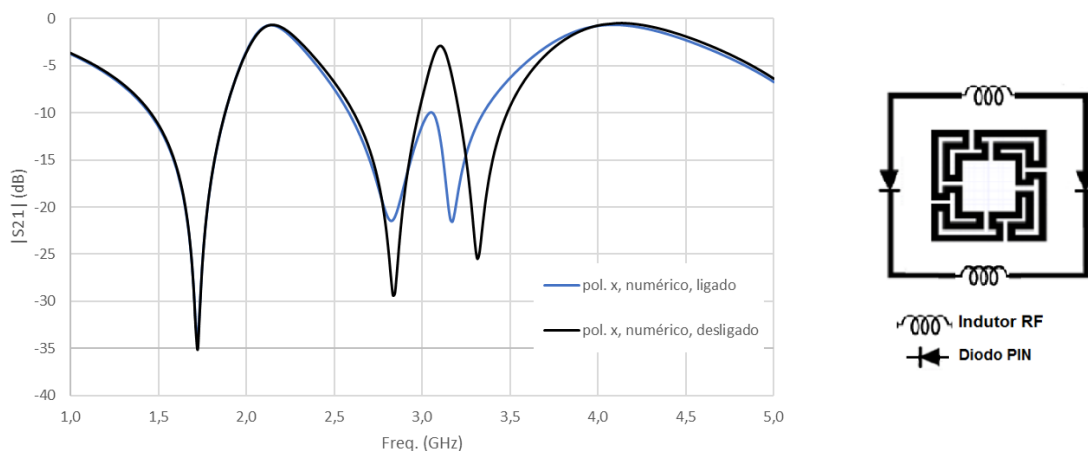


Fonte: Autoral

Na Figura 47, notam-se as três frequências de ressonância, a primeira frequência da matrioska em torno de 1,7 GHz, a frequência dos dipolos cruzados em torno de 2,8 GHz e a última frequência referente à geometria matrioska em torno de 3,3 GHz. Além disso, para as frequências de ressonância, observam-se poucas variações na resposta em frequência

com a alteração do estado ligado ou desligado do diodo PIN. Os valores obtidos estão resumidos na Tabela 5.

Figura 47 - Resposta em frequência da FSS reconfigurável com diodo PIN e indutor para RF, polarização x



Fonte: Autoral

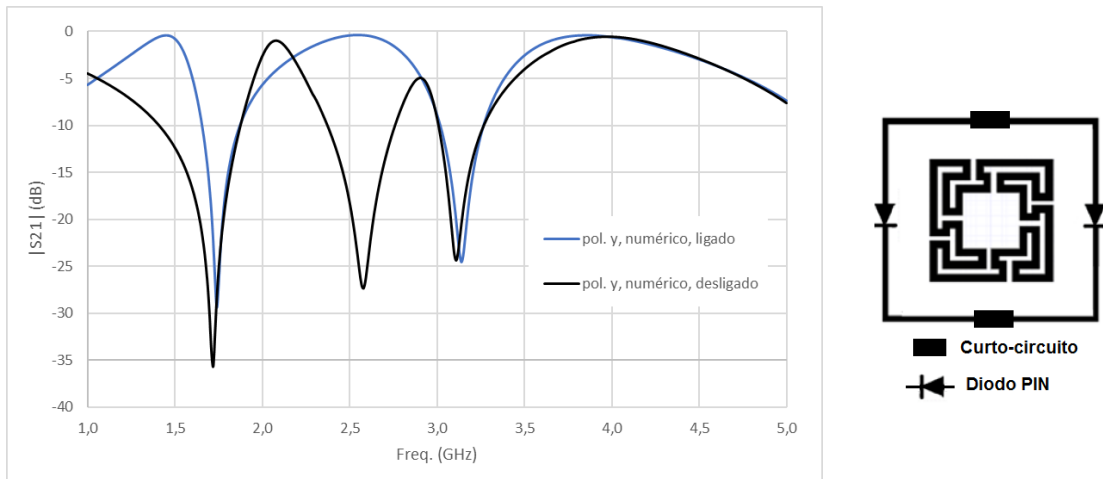
Tabela 5 – Resultados numéricos na polarização x

Geometria		RFSS01		RFSS02	
		Diodo ON	Diodo OFF	Diodo ON	Diodo OFF
f_{r1}	Matrioska	1,75 GHz	1,75 GHz	1,72 GHz	1,72 GHz
f_{r2}	Dipolo	-	-	2,82 GHz	2,83 GHz
f_{r3}	Matrioska	3,20GHz	3,35 GHz	3,17 GHz	3,31 GHz

4.1.3 Resultados numéricos para polarização y incluindo os diodos PIN e indutores para RF

A Figura 48 apresenta a resposta em frequência da FSS reconfigurável na polarização y com os diodos PIN e os curtos-circuitos. Quando o diodo PIN está desligado (OFF) a FSS reconfigurável têm 3 frequências de ressonância. Quando o diodo PIN está ligado (ON), ocorre a reconfiguração, na qual a frequência de ressonância da geometria dipolos cruzados é suprimida.

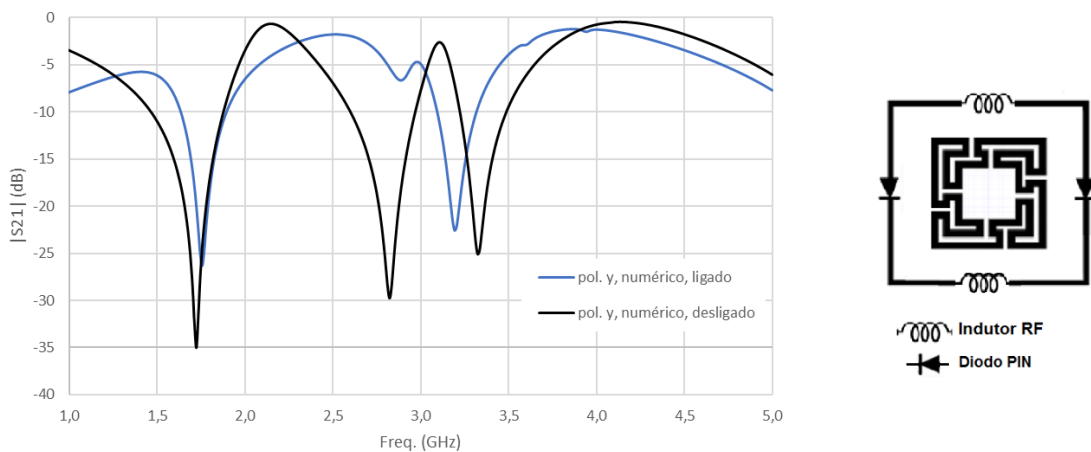
Figura 48 - Resposta em frequência da FSS reconfigurável com diodo PIN e curto-circuito, polarização y



Fonte: Autoral

Com a retirada dos curtos-circuitos e a inclusão do indutor para RF, a resposta em frequência na polarização y, Figura 49, é praticamente igual da RFSS01 com três frequências de ressonância, sendo que a frequência dos dipolos é suprimida quando o diodo PIN está no estado ligado. A Tabela 6 exhibe os resultados obtidos para polarização y.

Figura 49 - Resposta em frequência da FSS reconfigurável com diodo PIN e indutores, polarização y



Fonte: Autoral

Tabela 6 – Resultados numéricos na polarização y

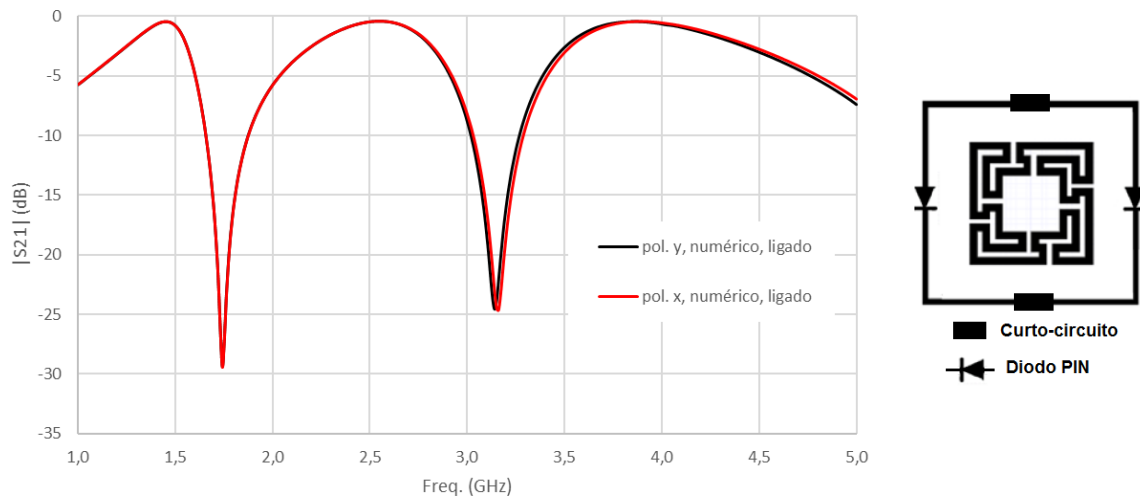
Geometria		RFSS01		RFSS02	
		Diodo ON	Diodo OFF	Diodo ON	Diodo OFF
f_{r1}	Matrioska	1,75 GHz	1,75 GHz	1,75 GHz	1,72 GHz
f_{r2}	Dipolo	-	2,90 GHz	-	2,82 GHz
f_{r3}	Matrioska	3,35GHz	3,35 GHz	3,19 GHz	3,32 GHz

4.1.4 Resultados numéricos para as polarizações x e y

Na Figura 50 são apresentadas as respostas em frequência para RFSS01, polarizações x e y , com o diodo PIN no estado ligado, comportando-se como um curto-circuito. Sendo assim, a frequência de ressonância referente à geometria dipolos cruzados é suprimida.

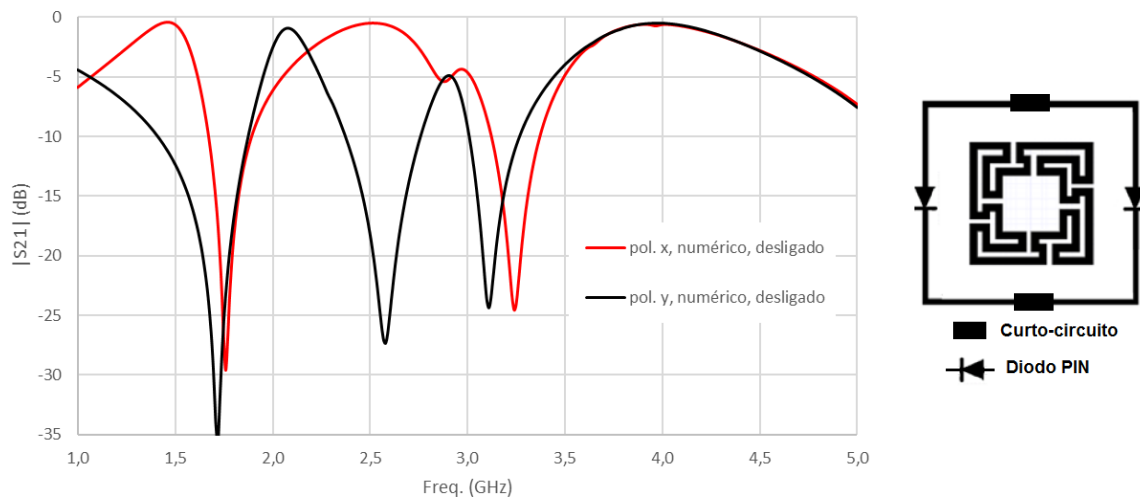
A Figura 51 mostra o comportamento da RFSS01 nas polarizações x e y , quando o diodo PIN está desligado. A resposta em frequência da polarização x não se altera com a mudança do estado do diodo PIN, porém na polarização y existem três frequências de ressonância. Com isto, conclui-se que a RFSS01 será reconfigurável na polarização y , de acordo com o estado do diodo PIN. Se o diodo estiver ligado, a resposta em frequência terá duas frequências de ressonância na polarização y e se estiver desligado terá três frequências de ressonância.

Figura 50 - Resposta em frequência da RFSS01, diodo PIN no estado ligado, polarizações x e y .



Fonte: Autoral

Figura 51 - Resposta em frequência da RFSS01, diodo PIN no estado desligado, polarizações x e y .

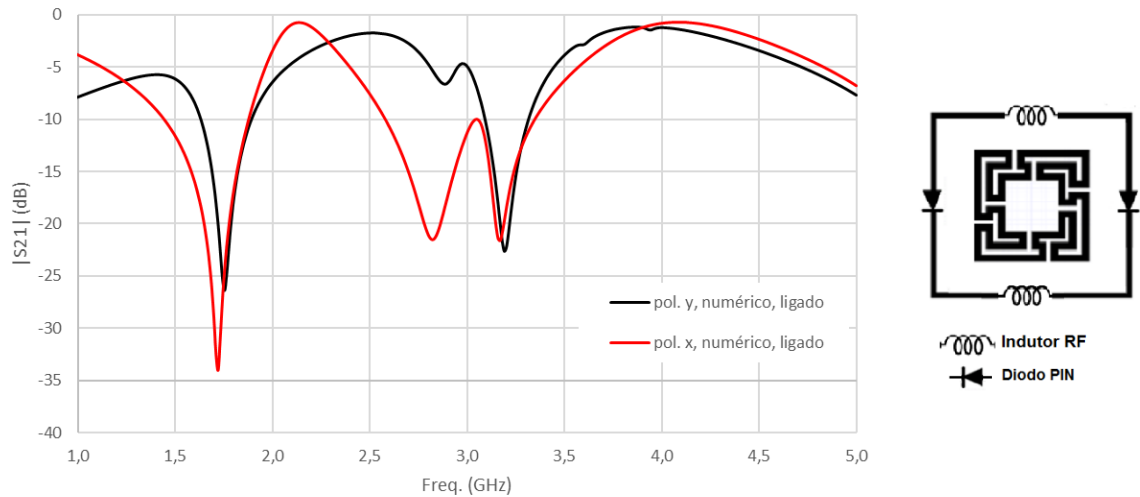


Fonte: Autoral

A Figura 52 apresenta a resposta em frequência para RFSS02 quando o diodo PIN está desligado. Nota-se que na polarização x têm-se três frequências de ressonância,

mantendo a frequência de ressonância associada à geometria dipolos cruzados. Continua-se observando a reconfiguração na polarização y .

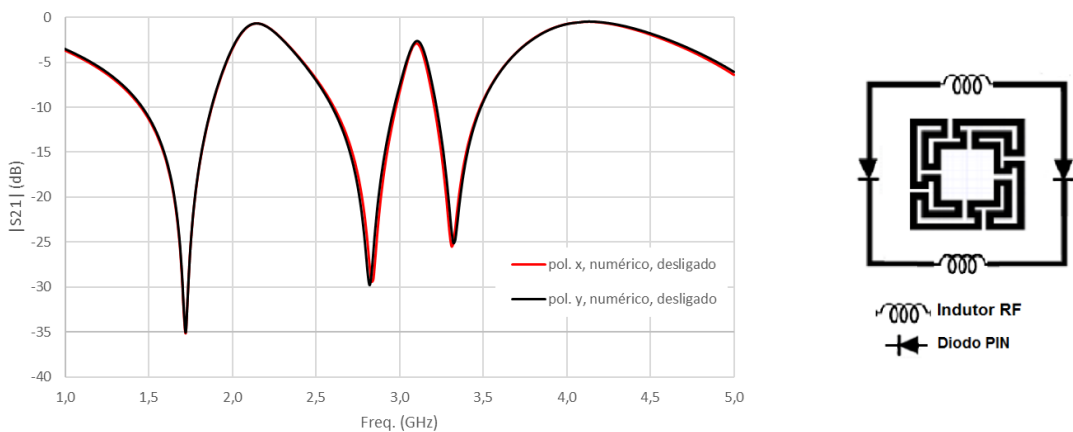
Figura 52 - Resposta em frequência da RFSS02, diodo PIN no estado ligado, polarizações x e y .



Fonte: Autoral

A Figura 53 mostra o comportamento da frequência de ressonância da RFSS02 na polarização x e y , quando o diodo PIN está desligado, com as três frequências de ressonância.

Figura 53 - Resposta em frequência da RFSS01, diodo PIN no estado desligado, polarizações x e y .

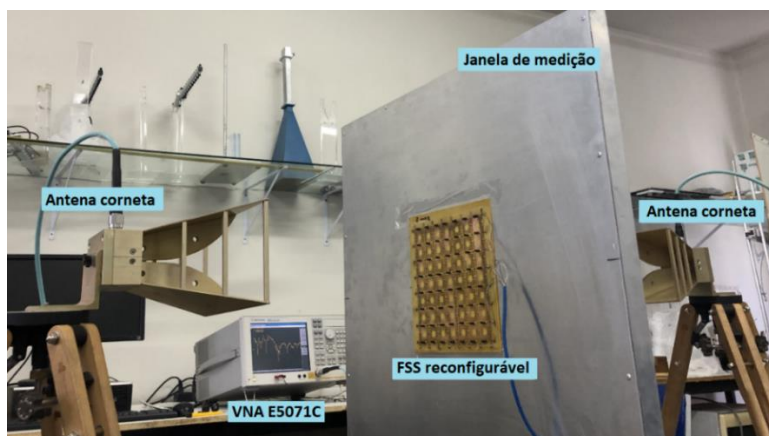


Fonte: Autoral

4.2 RESULTADO EXPERIMENTAIS

Na caracterização experimental as medições foram realizadas no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA-IFPB, utilizando duas antenas cornetas banda larga SAS-571 [65], um analisador de redes vetorial de duas portas Agilent, VNA E5071C [66] e uma janela de medição, Figura 54.

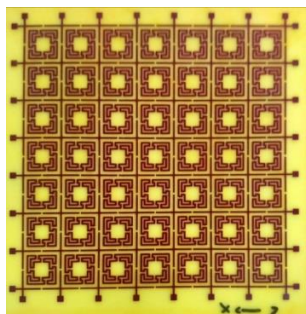
Figura 54 - Configuração de medição



Fonte: Autoral

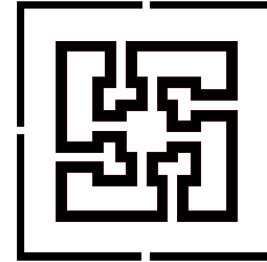
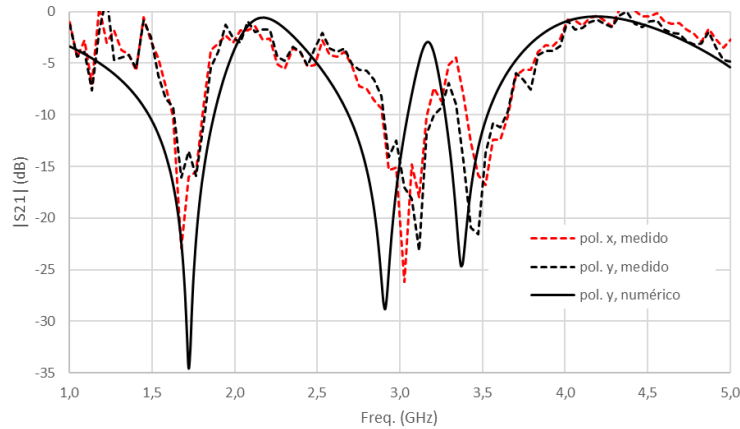
Primeiramente foi realizada a caracterização experimental da FSS com associação das geometrias dipolos cruzados e matrioska, sem os diodos PIN ou curto-circuito. Foi fabricada uma FSS reconfigurável com 7×7 células, dimensão total de $210 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$, Figura 55. As dimensões são as mesmas apresentadas na Tabela 1, tendo sido obtidos os resultados apresentados na Figura 56. Conforme mencionado anteriormente, numericamente, os resultados para polarização x e y são iguais, sendo apresentado o resultado numérico apenas para polarização y .

Figura 55 – FSS com geometrias dipolos cruzados e matrioska



Fonte: Autoral

Figura 56 - Resposta em frequência da FSS reconfigurável sem os diodos PIN e sem os curtos-circuitos – Resultados experimentais.



Fonte: Autoral

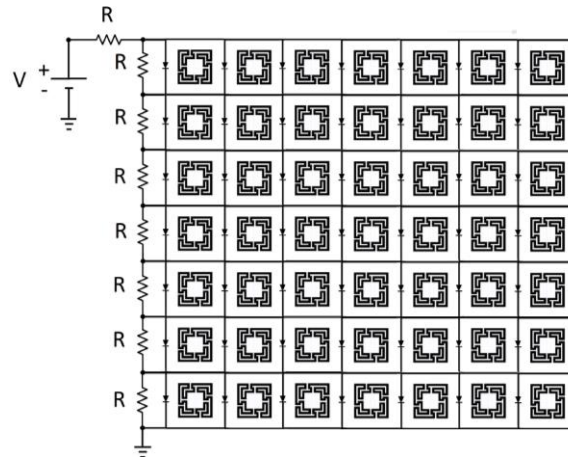
A Tabela 7 apresenta a diferença percentual entre os valores calculados e numéricos, baseado nas medições realizadas para polarizações x e y . O cálculo das diferenças foi baseado no pior caso entre as duas polarizações.

Tabela 7 - Frequências de ressonâncias das geometrias associadas

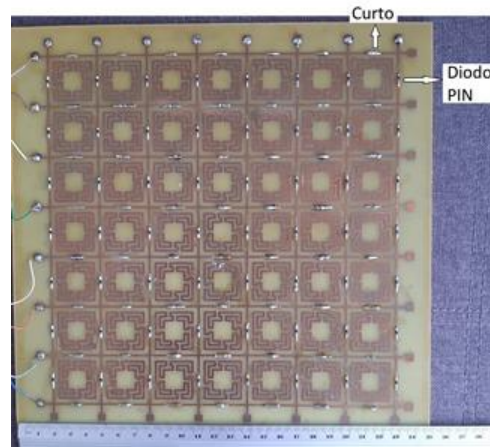
	Geometria	Numérico (HFSS)	Calculado Eq. (1) – (6)	Medição Pol. X	Medição Pol. y	Diferença Numérico	Diferença Calculado
f_{r1}	Matrioska	1,72 GHz	1,94 GHz	1,68 GHz	1,68 GHz	2,4%	15%
f_{r2}	Dipolo	2,91 GHz	3,16 GHz	3,03 GHz	3,12 GHz	6,7%	4,3%
f_{r3}	Matrioska	3,37 GHz	3,27 GHz	3,52 GHz	3,48 GHz	4,3%	6%

Os diodos PIN utilizados foram do tipo PIN BAR 64-03W [75] polarizados por meio de um arranjo de 8 resistores iguais (150Ω), Figura 56. Os resistores atuaram como limitador de corrente e divisor de tensão, para distribuir de forma igualitária a tensão nas linhas da FSS.

Figura 57 - FSS reconfigurável com os diodos PIN e os curtos-circuitos – RFSS01.



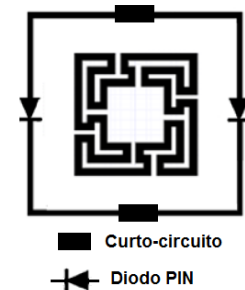
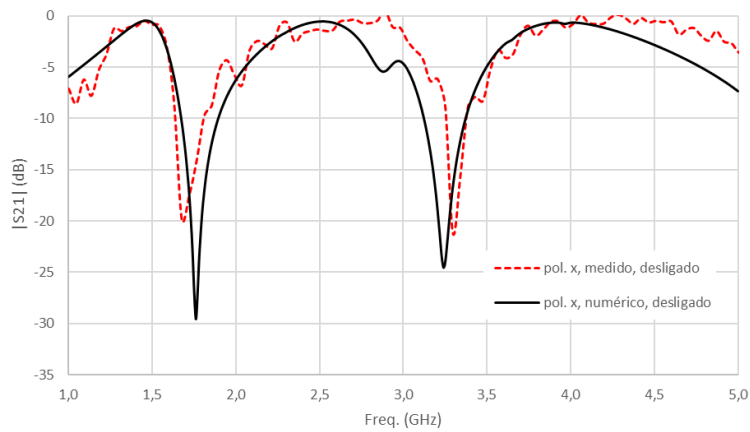
(a) Esquema do circuito de polarização



(b) FSS reconfigurável fabricada – RFSS01

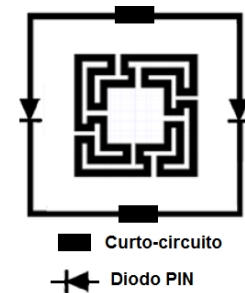
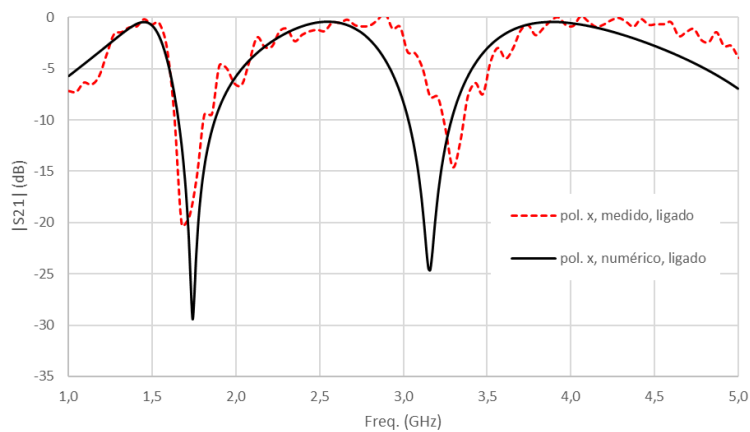
Na Figura 58 são apresentados os resultados para a polarização x , considerando os diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado) e na Figura 59 os diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12,0$ V, ligado). Não é observada a ressonância relativa ao dipolo, que foi suprimida pela presença do curto-circuito, permanecendo apenas as ressonâncias da geometria matrioska, em 1,68 GHz e 3,30 GHz. Por outro lado, para polarização x , os estados ligado e desligado do diodo PIN, não afetam a resposta em frequência da FSS.

Figura 58 - Respostas em frequência da RFSS01, polarização x , diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado)



Fonte: Autoral

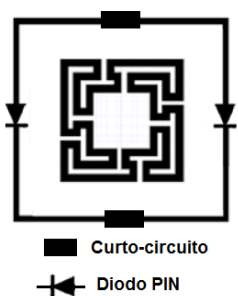
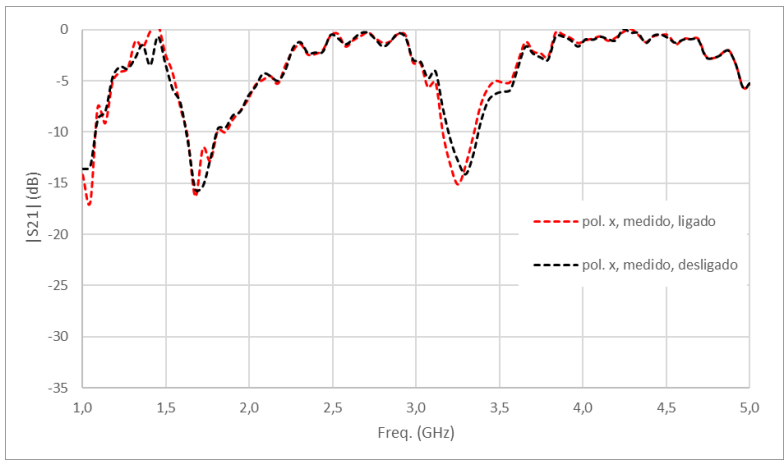
Figura 59 - Respostas em frequência da RFSS01, polarização x , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12$ V, ligado)



Fonte: Autoral

Na Figura 60, verifica-se que praticamente não há variação da resposta em frequência para os estados ligado/desligado na polarização x , concordando com os resultados numéricos apresentados anteriormente.

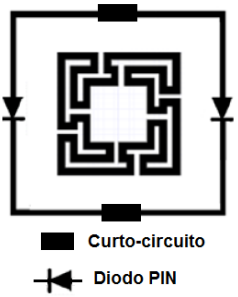
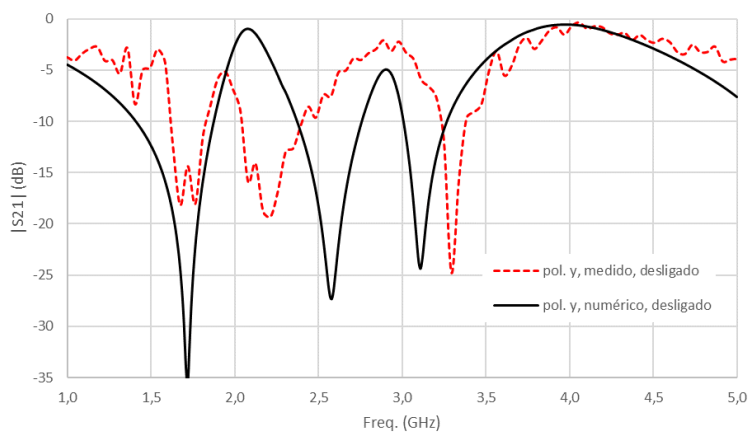
Figura 60 - Respostas em frequência da RFSS01, polarização x, diodos PIN ligado/desligado



Fonte: Autoral

Na Figura 61 são apresentados os resultados para a polarização y, considerando os diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado), verificando-se um comportamento semelhante aos resultados numéricos. A primeira frequência de ressonância apresenta uma boa concordância (1,68 GHz medido, 1,72 GHz numérico).

Figura 61 - Resposta em frequência da RFSS01, polarização y, diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado).

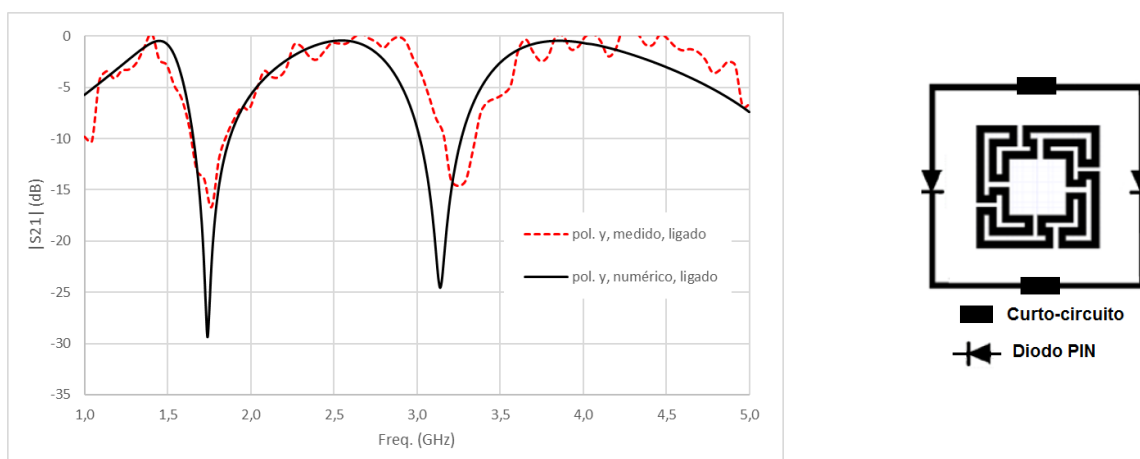


Fonte: Autoral

A frequência de ressonância do dipolo apresentou uma diferença de aproximadamente 16%. Nos resultados numéricos, o deslocamento da frequência de ressonância do dipolo para uma frequência mais elevada também foi responsável pela maior diferença entre os resultados para a terceira frequência de ressonância (3,30 GHz, 3,11 GHz), uma diferença de 6,1%. Essa diferença da frequência de ressonância associada ao dipolo será discutida mais adiante nesta dissertação, seção 4.3.

Na Figura 62 são apresentados os resultados para a polarização y , considerando os diodos PIN diretamente polarizados, observando-se uma boa concordância entre o resultado numérico e medido. Neste caso, a ressonância do dipolo é suprimida, permanecendo apenas as ressonâncias associada à geometria matrioska.

Figura 62 - Resposta em frequência da RFSS01, polarização y , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12,0$ V, ligado)



Fonte: Autoral

A Tabela 8 e a

Tabela 9 exibem a diferença percentual entre os valores numéricos e medidos nas polarizações x e y para a FSS reconfigurável com os diodos PIN e os curtos-circuitos. A caracterização apresentou bons resultados, com a maior variação de 7,59% para segunda frequência de ressonância, na polarização y , diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado).

Tabela 8 - Frequências de ressonâncias da RFSS01 na polarização x

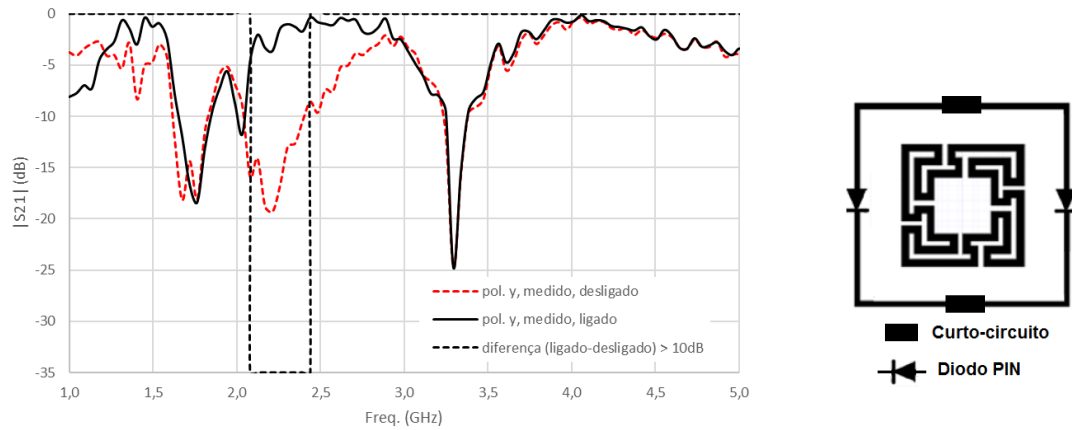
	Geometria	Numérico (HFSS) ON	Numérico (HFSS) OFF	Medição ON	Medição OFF	Diferença ON	Diferença OFF
f_{r1}	Matrioska	1,74 GHz	1,75 GHz	1,67 GHz	1,67 GHz	4,19 %	4,79 %
f_{r2}	Dipolo	-	-	-	-	-	-
f_{r3}	Matrioska	3,16 GHz	3,25 GHz	3,29 GHz	3,29 GHz	4,11 %	1,23 %

Tabela 9 - Frequências de ressonâncias da RFSS01 na polarização y

	Geometria	Numérico (HFSS) ON	Numérico (HFSS) OFF	Medição ON	Medição OFF	Diferença ON	Diferença OFF
f_{r1}	Matrioska	1,74 GHz	1,72 GHz	1,79 GHz	1,63 GHz	2,87 %	5,52 %
f_{r2}	Dipolo	-	2,58 GHz	-	2,21 GHz		16,74 %
f_{r3}	Matrioska	3,14GHz	3,11 GHz	3,21 GHz	3,29 GHz	2,23 %	5,79

Nota-se que neste caso, de maneira semelhante à polarização em x , a frequência de ressonância do dipolo desloca-se para fora da faixa de interesse, obtendo-se a reconfiguração da RFSS01 na polarização y , Figura 63, com a faixa de frequência reconfigurável de 0,36 GHz, de 2,08 GHz até 2,44 GHz, para uma diferença entre os estados ligado/desligado de pelo menos 10 dB.

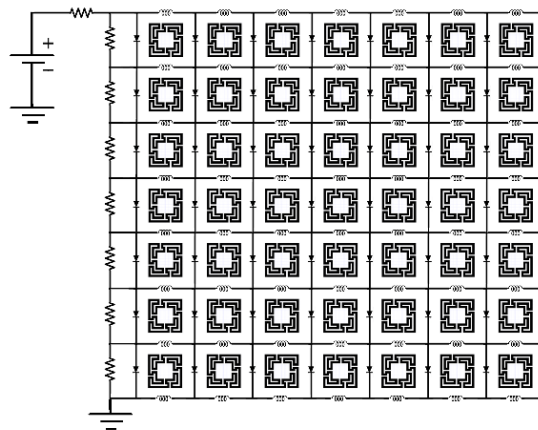
Figura 63 - Resposta em frequência da RFSS01, polarização y, diodos PIN diretamente e reversamente polarizados.



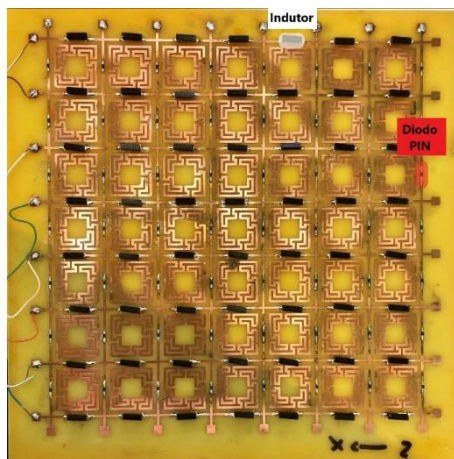
Fonte: Autoral

Seguindo com os resultados experimentais, o curto-circuito foi substituído pelo indutor para RF 4310LC-132KEB [83], Figura 64, com o esquema do circuito de polarização e as dimensões especificadas para a RFSS01. O objetivo dessa substituição é manter a ressonância do dipolo na polarização *x*.

Figura 64 - FSS reconfigurável com os diodos PIN e os indutores RF – RFSS02



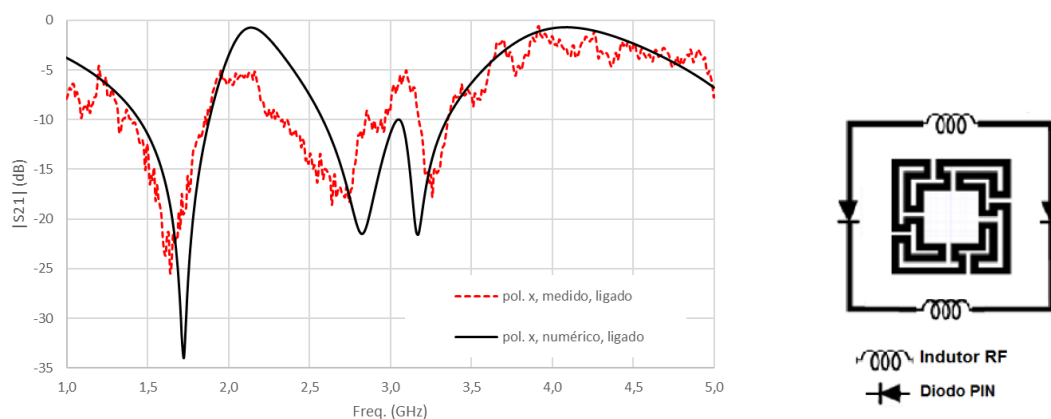
(a) Esquema do circuito de polarização



(b) FSS reconfigurável fabricada – RFSS02

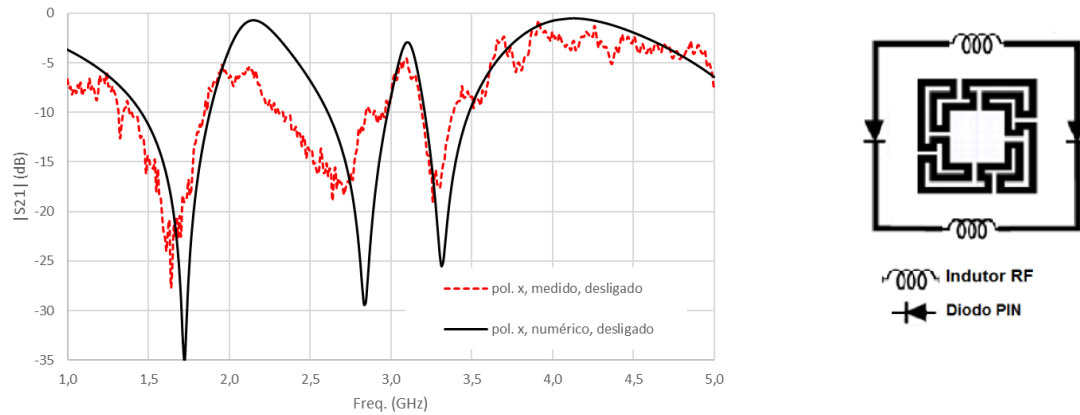
Nas Figura 65 e 66 são apresentados os resultados para a polarização x , estados ligado e desligado, respectivamente, sendo observadas as três frequências de ressonância. Comparando os resultados numéricos e medidos, observa-se que os resultados medidos são praticamente os mesmos para os estados ligado e desligado, Figura 65 e 66. Para os resultados numéricos, conforme apresentado na Figura 46, as frequências de ressonância são praticamente iguais, com uma maior diferença para a terceira frequência de ressonância. Os resultados experimentais estão de acordo com o esperado, porém os resultados numéricos requerem uma investigação mais detalhada.

Figura 65 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização x , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12$ V, ligado).



Fonte: Autoral

Figura 66 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização x , diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado).

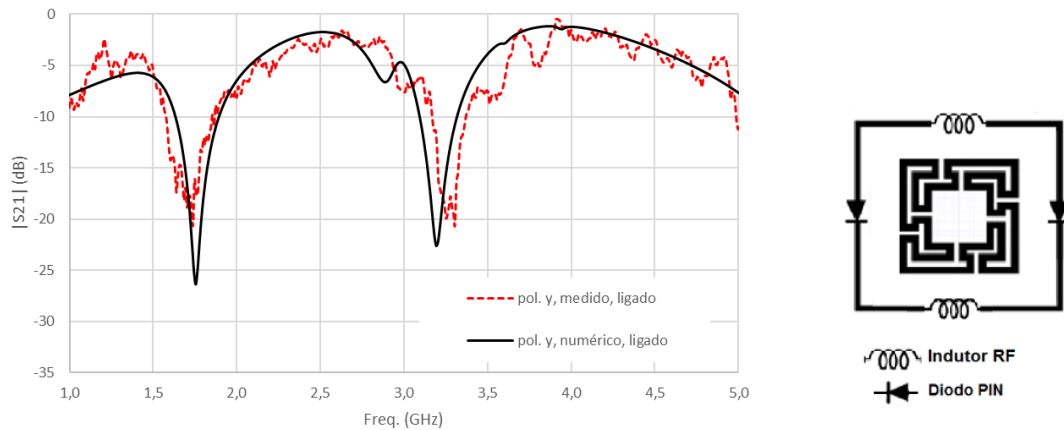


Fonte: Autoral

Considerando a polarização y , na Figura 67 são apresentados os resultados para o diodo PIN no estado ligado (ON), verificando-se que, como esperado, a frequência associada aos dipolos cruzados é suprimida, observando-se uma boa concordância entre resultados numéricos e experimentais.

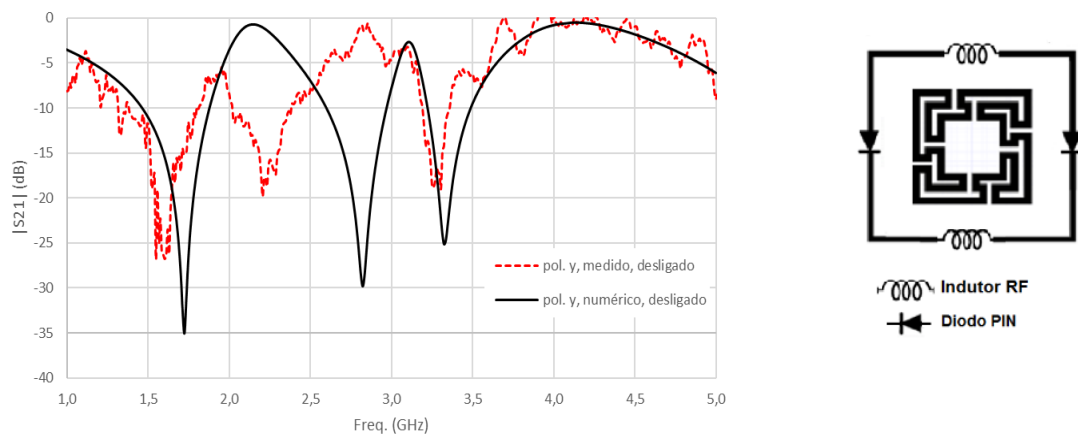
Ainda considerando a polarização y , na Figura 68 são apresentados os resultados para diodo PIN no estado desligado (OFF), sendo observada a frequência associada aos dipolos cruzados, obtendo-se a reconfiguração desejada. Observa-se que as FSSS RFSS01 e RFSS02, na polarização y , apresentam praticamente a mesma resposta em frequência. Podendo a frequência de ressonância da geometria dipolos cruzados ser ativada ou não, dependendo do estado de polarização do diodo PIN.

Figura 67 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização y, diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12\text{ V}$, ligado).



Fonte: Autoral

Figura 68 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização y, diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0\text{ V}$, desligado).



Fonte: Autoral

Nas Tabela 10 e Tabela 11, são comparados os valores numéricos e medidos para RFSS02 nas polarizações x e y , e com o diodo ligado (ON) e desligado (OFF). Os resultados medidos e numéricos, apresentam valores próximos em quase todas as frequências de ressonância, sendo a maior diferença de 26,46%, referente ao dipolo cruzado na polarização y , o que será discutido na seção 4.3.

Tabela 10 – Frequências de ressonâncias da RFSS02 na polarização x

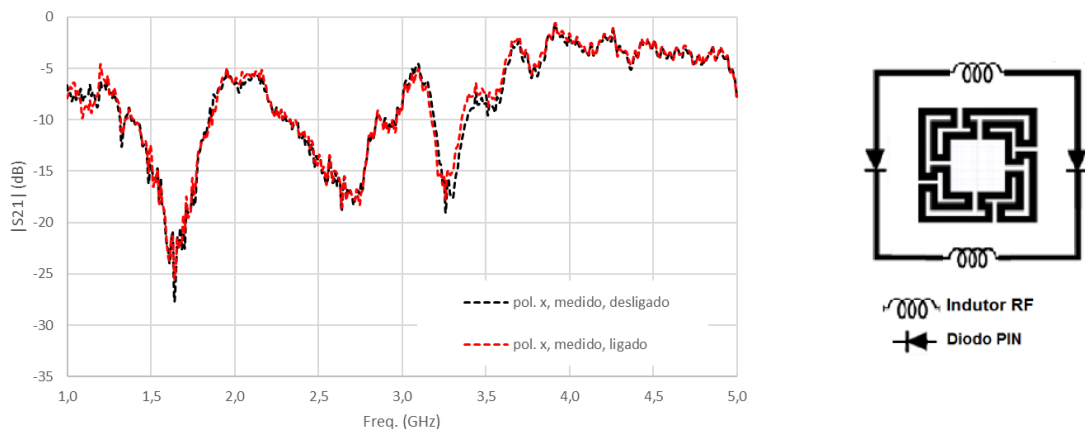
	Geometria	Numérico (HFSS) ON	Numérico (HFSS) OFF	Medição ON	Medição OFF	Diferença ON	Diferença OFF
f_{r1}	Matrioska	1,72 GHz	1,72 GHz	1,66 GHz	1,66 GHz	3,61 %	3,61 %
f_{r2}	Dipolo	2,82 GHz	2,83 GHz	2,75 GHz	2,73 GHz	2,55 %	3,53 %
f_{r3}	Matrioska	3,17 GHz	3,31 GHz	3,30 GHz	3,31 GHz	4,10 %	0%

Tabela 11 - Frequências de ressonâncias RFSS02 na polarização y

	Geometria	Numérico (HFSS) ON	Numérico (HFSS) OFF	Medição ON	Medição OFF	Diferença ON	Diferença OFF
f_{r1}	Matrioska	1,75 GHz	1,72 GHz	1,76 GHz	1,62 GHz	0,57%	6,17%
f_{r2}	Dipolo	-	2,82 GHz	-	2,23 GHz	-	26,46%
f_{r3}	Matrioska	3,19 GHz	3,32 GHz	3,30 GHz	3,28 GHz	3,45%	1,22%

Na Figura 69 observa-se a resposta em frequência da RFSS02 na polarização x, o indutor para RF isolou adequadamente os braços horizontais dos dipolos cruzados, garantindo a conservação das três frequências de ressonância na polarização x.

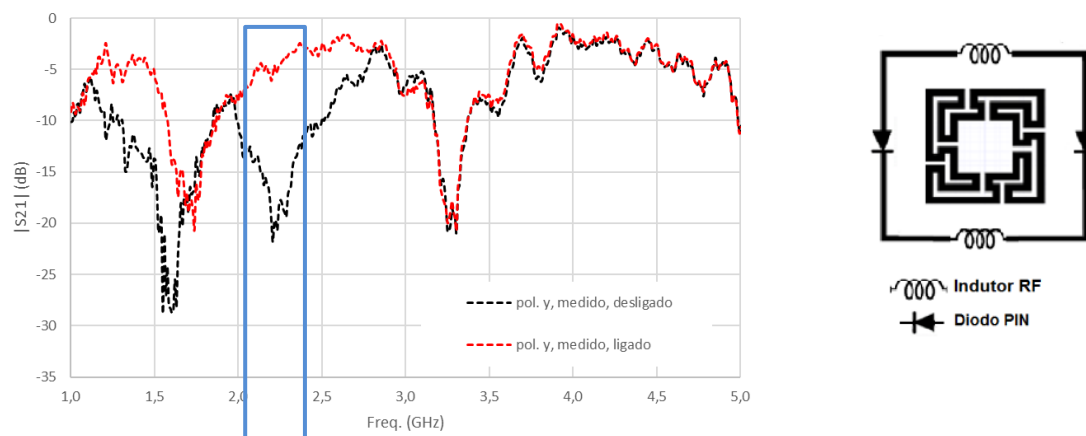
Figura 69 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização x, diodos PIN ligados/desligados



Fonte: Autoral

Na Figura 70 é verificada a reconfiguração na polarização y , com largura de banda de 0,24 GHz, de 2,14 GHz a 2,38 GHz, para pelo menos 10 dB de diferença entre os estados ligado e desligado do diodo PIN.

Figura 70 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização y , diodos ligados/desligados



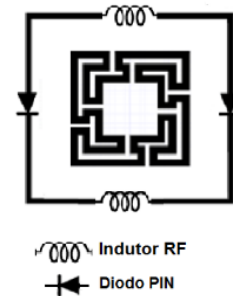
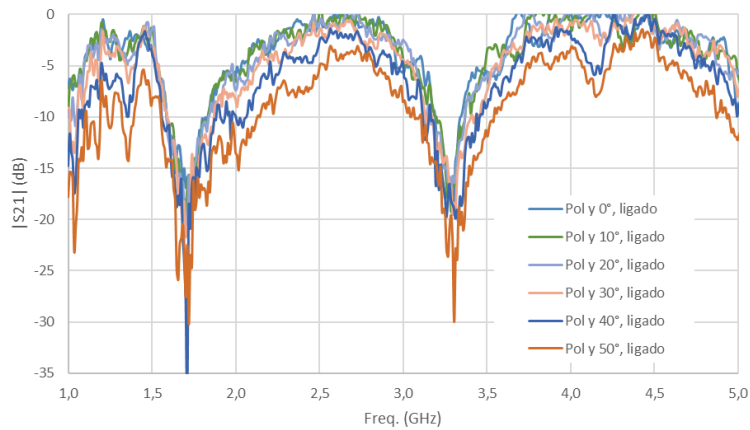
Fonte: Autoral

Durante a caracterização experimental da RFSS02, foi analisada a reconfiguração na polarização y , de acordo com a variação angular. Para isso o ângulo do *setup* de medição foi alterado para 0° , 10° , 20° , 30° , 40° e 50° , com o diodo PIN nos estados ligado e desligado.

Na Figura 71 é apresentada a resposta em frequência para a FSS reconfigurável na polarização y , considerando a tensão de 12 V, diodo PIN no estado ligado (ON). As frequências de ressonância se mantiveram praticamente as mesmas, tendo sido suprimida a ressonância associada à geometria dipolos cruzados.

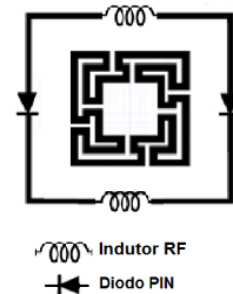
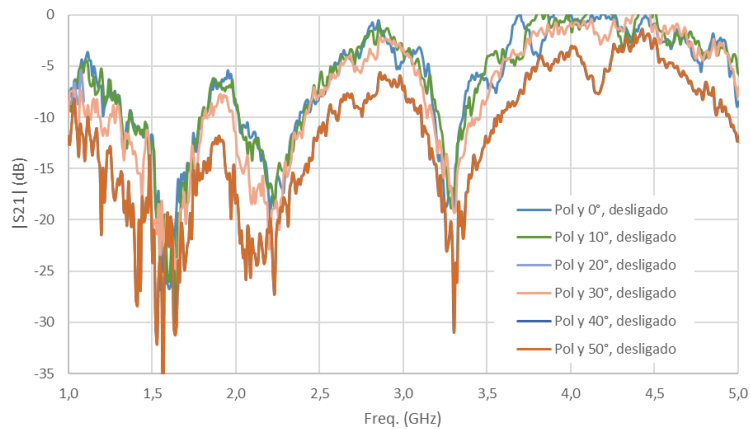
Para o estado desligado do PIN (OFF), tensão 0 V, são apresentados os resultados na Figura 72, com a mesma variação angular da Figura 70. Confirmam-se a reconfiguração e a estabilidade, com três frequências de ressonância, duas associadas à geometria matrioska e uma à geometria dipolos cruzados.

Figura 71 - Resposta em frequência da RFSS02 com variação angular, polarização y, diodos PIN diretamente polarizados (V = 12 V, ligado).



Fonte: Autoral

Figura 72 - Resposta em frequência da RFSS02 com variação angular, polarização y, diodos PIN reversamente polarizados (V = 0,0 V, desligado).



Fonte: Autoral

As Tabela 12 e 13, mostram as frequências de ressonância da RFSS02 com a variação angular de 0°, 10°, 20°, 30°, 40° e 50°, na polarização y. Os valores medidos foram similares, mesmo com a variação dos ângulos e do estado dos diodos PIN.

Tabela 12 - Frequências de ressonâncias da RFSS02 na polarização y , com variação angular, diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0$ V, desligado).

	Geometria	0°	10°	20°	30°	40°	50°
f_{r1}	Matrioska	1,62 GHz	1,63 GHz	1,64 GHz	1,64 GHz	1,69 GHz	1,56 GHz
f_{r2}	Dipolo	2,23 GHz	2,23 GHz	2,24 GHz	2,20 GHz	2,20 GHz	2,23 GHz
f_{r3}	Matrioska	3,28 GHz	3,28 GHz	3,28 GHz	3,30 GHz	3,33 GHz	3,30 GHz

Tabela 13 - Frequências de ressonâncias da RFSS02 na polarização y , com variação angular, diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12$ V, ligado)

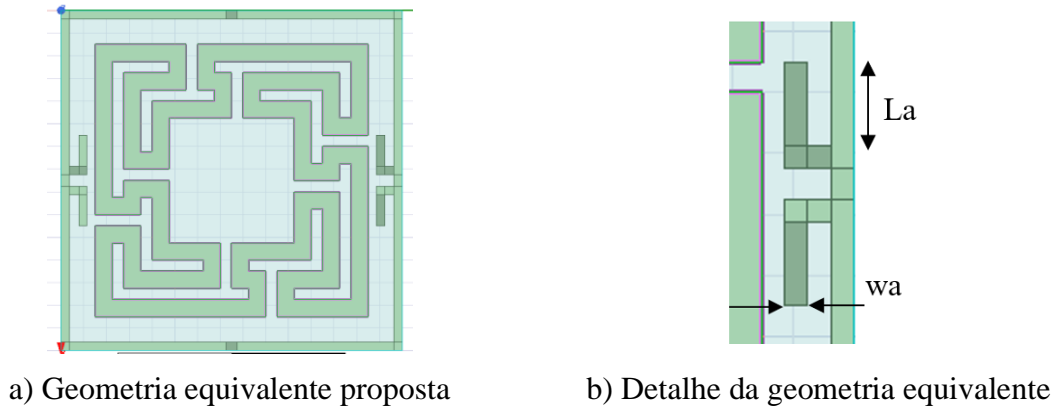
	Geometria	0°	10°	20°	30°	40°	50°
f_{r1}	Matrioska	1,76 GHz	1,7 GHz	1,71 GHz	1,70 GHz	1,71 GHz	1,72 GHz
f_{r2}	Dipolo	-	-	-	-	-	-
f_{r3}	Matrioska	3,30 GHz	3,28 GHz	3,28 GHz	3,29 GHz	3,33 GHz	3,30 GHz

4.3 ADEQUAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Um dos desafios encontrados nesta dissertação foi estabelecer um modelo numérico que traduzisse de maneira adequada o estado desligado do diodo PIN, quando inserido na FSS. Embora se tenha tentado melhorar os resultados incrementando o modelo do diodo PIN, incluindo capacitâncias e indutâncias, os resultados obtidos não foram satisfatórios, como pode ser visto nas Figuras 61 e 68. Portanto, deseja-se alterar apenas a ressonância associada à geometria dipolos cruzados, sem alterar as demais ressonâncias.

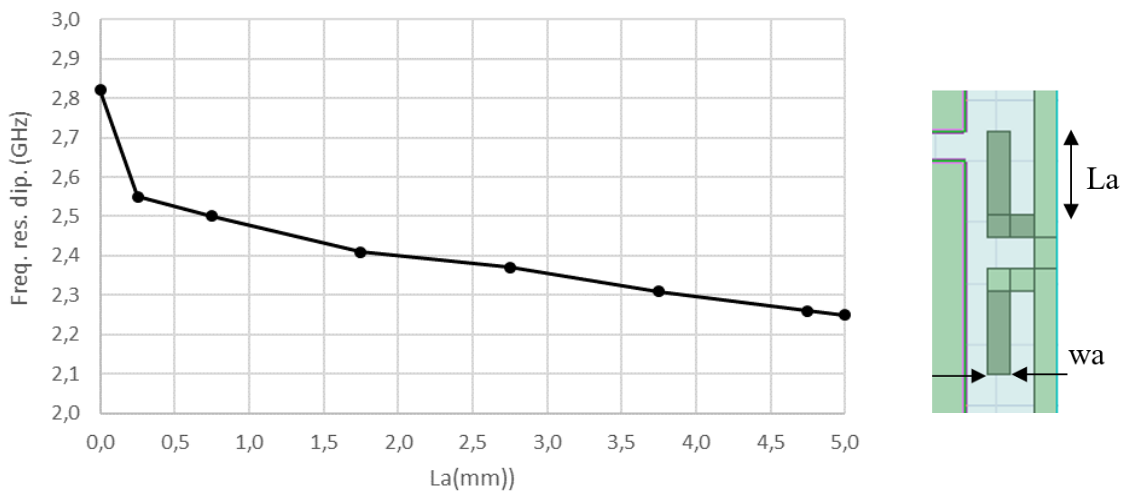
A solução mais adequada foi considerar uma geometria equivalente, na qual é inserido um trecho de linha de transmissão, como ilustrado na Figura 73. O trecho de linha de transmissão foi centralizado entre as geometrias dipolos cruzados e matrioska, tendo sido adotada uma largura igual a metade da largura do dipolo ($wa = w/2$). O comprimento do trecho de linha é variado até que o resultado esperado seja alcançado. Neste caso, o resultado esperado foi a frequência de ressonância medida para a polarização y , tensão reversa 0 V, Figura 68. Para ilustrar o efeito da presença do trecho de linha de transmissão, na Figura 74 é apresentada a frequência de ressonância associada à geometria dipolos cruzados em função do comprimento La , onde $La = 0,0$ mm corresponde a estrutura original.

Figura 73 - Geometria equivalente.



Fonte: Autoral

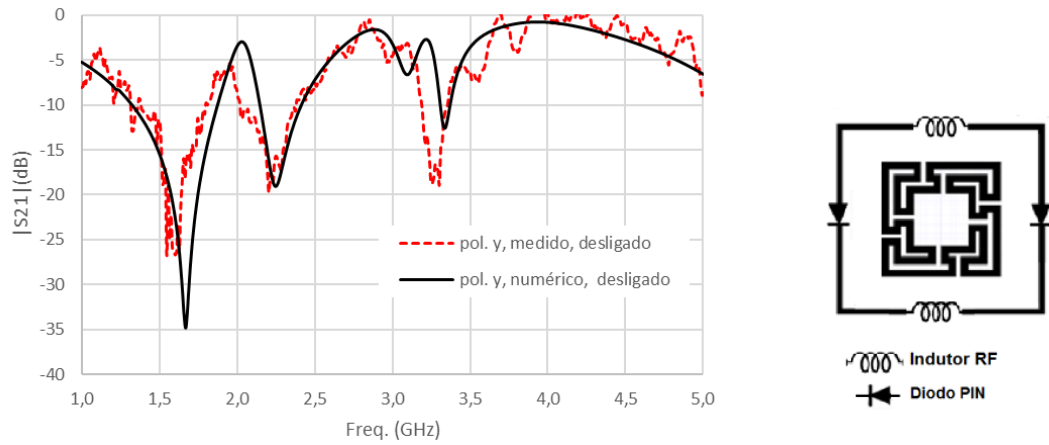
Figura 74 - Frequência de ressonância associada à geometria dipolos cruzados em função de L_a , diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0$ V, desligado).



Fonte: Autoral

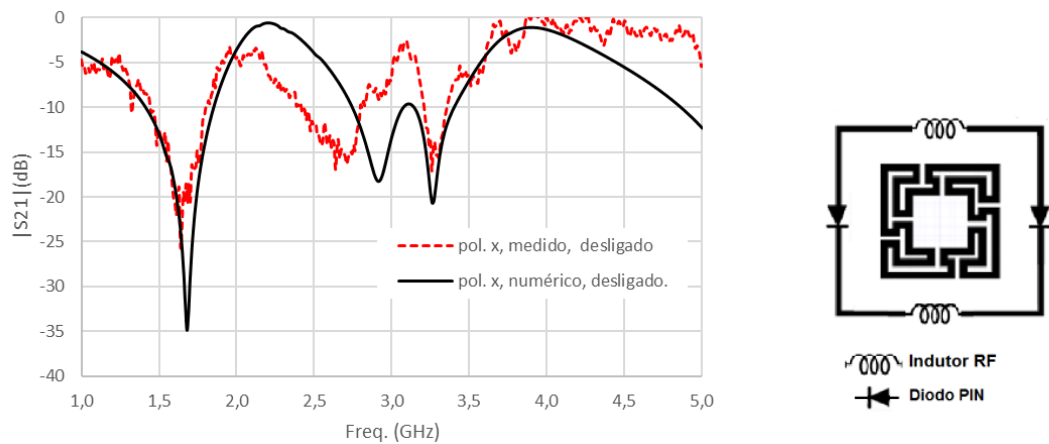
Verifica-se que a ressonância associada à geometria dipolos cruzados pode ser ajustada adequadamente. Outra vantagem, é que esse artifício praticamente não altera a resposta em frequência para o diodo PIN no estado ligado (ON), nem as ressonâncias associadas à geometria matrioska, ou mesmo a resposta em frequência para a polarização x , como pode ser visto nas Figuras 75–Figura 78.

Figura 75 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização y, diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado), $La = 5,0$ mm.



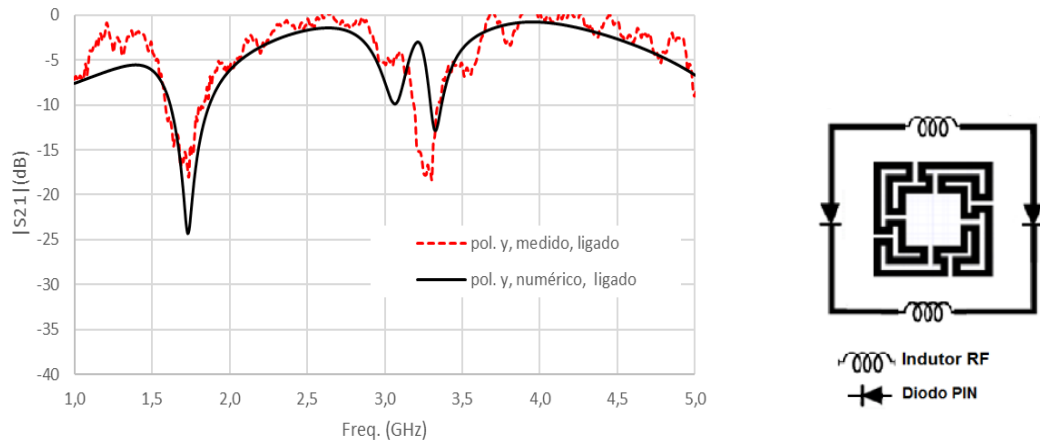
Fonte: Autoral

Figura 76 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização x, diodos PIN reversamente polarizados ($V = 0,0$ V, desligado), $La = 5,0$ mm.



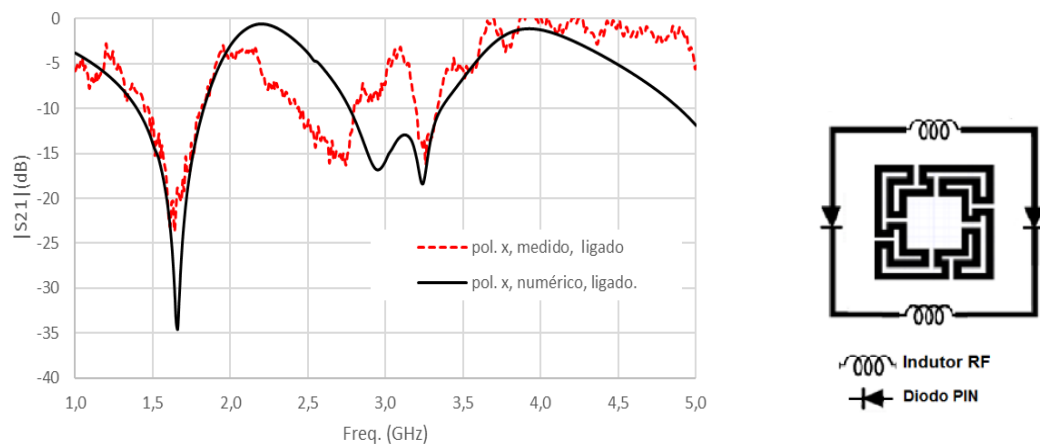
Fonte: Autoral

Figura 77 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização y , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12\text{ V}$, ligado), $La = 5,0\text{ mm}$.



Fonte: Autoral

Figura 78 - Resposta em frequência da RFSS02, polarização x , diodos PIN diretamente polarizados ($V = 12\text{ V}$, ligado), $La = 5,0\text{ mm}$.



Fonte: Autoral

Embora os resultados obtidos com a geometria equivalente sejam bastante promissores, ainda se faz necessário um estudo mais detalhado, principalmente para a determinação do comprimento La a ser adotado, sem a necessidade de um resultado experimental prévio.

CAPÍTULO 5

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi descrita uma FSS reconfigurável associando as geometrias dipolos cruzadas e matrioska. Dessa forma se obteve uma FSS com três frequências de ressonância, duas associadas à geometria matrioska e uma à geometria dipolos cruzados.

A reconfiguração é obtida para a ressonância associada à geometria dipolos cruzados, por meio da inserção de diodos PIN nos braços verticais, e, portanto, para a polarização y . A inserção de indutores de RF nos braços horizontais dos dipolos cruzados, preservou as ressonâncias para a polarização x , uma vez que essas em geral são suprimidas pelas linhas de polarização dos diodos PIN. Os diodos PIN e indutores para RF utilizados foram descritos, bem como a maneira como esses foram incluídos na simulação numérica.

As equações iniciais para a determinação das frequências de ressonância apresentaram bons resultados, quando comparadas aos resultados numéricos e experimentais, o que confirma a sua aplicabilidade como etapa inicial de projeto.

Foi fabricado um protótipo com frequências de operação em torno de 1,75 GHz, 2,23 GHz e 3,28 GHz, sendo a segunda frequência ativada ou suprimida, de acordo com o estado do diodo PIN. O protótipo foi caracterizado experimentalmente de maneira gradativa. Inicialmente foi caracterizado sem os diodos PIN e sem os indutores. Depois com diodos PIN e curtos-circuitos no lugar dos indutores. Finalmente, os curtos foram substituídos por indutores para RF. Os resultados numéricos foram confirmados experimentalmente, exceto a ressonância de 2,33 GHz, diodo PIN estado aberto, polarização y . Entretanto, foi proposto um modelo numérico equivalente que apresentou resultados bastante interessantes.

Para a polarização y , foi verificada a reconfiguração da FSS, com largura de banda de 0,24 GHz, de 2,14 GHz a 2,38 GHz, para pelo menos 10 dB de diferença entre os estados dos diodos PIN ligado e desligado.

Por fim, destaque-se que a FSS reconfigurável proposta apresentou uma boa estabilidade angular para a polarização y .

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade do trabalho propõe-se o desenvolvimento de novas pesquisas, como, por exemplo:

- Investigar os parâmetros de reconfiguração da FSS, otimizando a sua resposta em frequência;
- Avaliar o efeito da largura da fita e dos espaçamentos entre os anéis na resposta em frequência da FSS reconfigurável desenvolvida;
- Aplicar as geometrias desenvolvidas na otimização de antenas;
- Otimizar o modelo equivalente proposto para caracterizar o diodo PIN no estado desligado quando inserido na FSS reconfigurável.

5.2 TRABALHOS PUBLICADOS

A. 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. **Publicado.**

A. 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", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*, 2021. **Aceito, aguardando publicação.**

A. 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", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*, 2021. **Aceito, aguardando publicação.**

REFERÊNCIAS

- [1] Bernard Marr, "The 7 biggest technology trends that will transform telecoms in 2020," *Forbes*, Dez. 01, 2020, disponível em: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/10/14/the-7-biggesttechnology-trends-that-will-transform-telecoms-in-2020/#db1345660332>.
- [2] B. O. hAnnaidh et al., "Devices and Sensors Applicable to 5G System Implementations," *2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies (IMWS-5G)*, Dublin, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/IMWS-5G.2018.8484316.
- [3] C. Occhiuzzi, S. Amendola, S. Nappi, N. D'Uva and G. Marrocco, "RFID Technology for Industry 4.0: Architectures and Challenges," *2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, Pisa, Italy, 2019, pp. 181-186, doi: 10.1109/RFID-TA.2019.8892049.
- [4] T. S. Evangelista, **Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços para Aplicação em 2,4 GHz**, Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, João Pessoa - PB, 2018.
- [5] J. Roberts, **Design of a Secure Electromagnetic Building**, The University of Sheffield, PhD Thesis, Sheffield - UK, 2014.
- [6] R. Pawan e J. R. Lee, "Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review," *Aerospace Science and Technology*, vol. 66, pp. 216-234, 2017.
- [7] Q. Guo, Z. Li, J. Su, J. Song and L. Y. Yang, "Active Frequency Selective Surface With Wide Reconfigurable Passband," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38348-38355, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906219.
- [8] U. Farooq, M. F. Shafique and M. J. Mughal, "Polarization insensitive dual band frequency selective surface for RF shielding through glass windows," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 1, pp. 93-100, Feb. 2020.
- [9] S. Cho, I. Lee and I. Hong, "Frequency selective film design for building walls for blocking wireless LAN signal," *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Busan, Korea (South), 2018, pp. 1-2.

- [10] Rana Sadaf Anwar, Lingfeng Mao and Huansheng Ning, "Frequency Selective Surfaces: A Review," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 9: 1689, pp. 1-46, 2018.
- [11] 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*, vol. 2, pp. 1288-1290, 2013.
- [12] A. G. Neto, J. C. e. Silva, A. J. René Serres, M. d. O. Alencar, I. B. G. Coutinho and T. d. S. Evangelista, "Dual-Band Band-Pass Frequency Selective Surface Based on the Matryoshka Geometry with Angular Stability and Polarization Independence," *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135542.
- [13] A. G. Neto, J. C. e Silva, I. B. G. Coutinho, M. de Oliveira Alencar, I. de França Albuquerque, B. L. G. dos Santos, "Polarization Independent Triple-Band Frequency Selective Surface Based on Matryoshka Geometry", *2019 18th edition of the SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aveiro, Portugal, 2019
- [14] A. G. Neto, J. C. e Silva, A. G. Barboza, D. F. Mamedes, I. B. G. Coutinho and M. de Oliveira Alencar, "Varactor-Tunable Four Arms Star Bandstop FSS With a Very Simple Bias Circuit," *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, 2019
- [15] A. N. Silva, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de U**, Instituto Federal da Paraíba, Dissertação de Mestrado, João Pessoa - PB, 2014.
- [16] P. H. B. Cavalcanti Filho, J. A. I. Araújo, M. R. T. de Oliveira, M. T. de Melo, A. G. Neto, I. B. G. Coutinho, "A New Design of Sierpinski Curve Fractal FSS for S-band Interference Protection Applications", *2019 18th edition of the SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aveiro, Portugal, 2019
- [17] H. P. A. Ferreira, **Matrioska: uma proposta de geometria para FSS multibandas**, Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, João Pessoa - PB, 2014.
- [18] "Qual é a história das matrioskas, as bonecas russas?," Redação umCOMO, 2017 janeiro 16. [Online]. Available: <https://educacao.umcomo.com.br/artigo/qual-e-a-historia-das-matrioskas-as-bonecas->. [Acesso em 01 agosto 2020].

- [19] A. Gomes Neto, A. G. D'Assunção Junior, J. C. Silva, J. N. Cruz e J. B. O. Silva, "Multiband frequency selective surface with open Matryoshka," em *9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisboa, Portugal, 2015.
- [20] A. Gomes Neto, J. C. Silva, J. N. Carvallho, J. N. Cruz e H. P. A. Ferreira, "Analysis of the resonant behavior of FSS using Matryoshka geometry," em *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, Porto de Galinhas, Brazil, 2015.
- [21] A. Gomes Neto, T. R. Sousa, J. C. Silva e D. F. Mamedes, "A Polarization Independent Frequency Selective Surface Based on the Matryoshka Geometry," em *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, Philadelphia - PA, 2018.
- [22] J. N. Cruz, **Caraterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta**, Instituto Federal da Paraíba, PPGE, Dissertação de Mestrado, João Pessoa - PB, 2014.
- [23] M. Mahmoodi e K. M. Donnell, "Novel FSS-based sensor for concurrent temperature and strain sensing," em *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, CA, 2017.
- [24] I. B. G. Coutinho, **Desenvolvimento de superfícies seletivas em frequência associando as geometrias dipolos cruzados e matrioska**, Instituto Federal da Paraíba, PPGEE, Dissertação de Mestrado, João Pessoa - PB, 2020.
- [25] A. G. Gomes Neto, J. C. Silva, Barboza, A. G., D. F. Mamedes, I. B. G. Coutinho e M. O. Alencar, "Varactor-Tunable Four Arms Star Bandstop FSS With a Very Simple Bias Circuit," em *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, 2019.
- [26] B. A. Munck, **Frequency Selective Surfaces: Theory and Design**, New York: John Wilwy & Sons, 2000.
- [27] D. Ferreira, I. Cuiñas, R. F. S. Caldeirinha e T. R. Fernandes, "3-D Mechanically tunable square slot FSS," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, n° 1, pp. 242-250, 2016.
- [28] T. K. Wu, **Frequency-Selective Surface and Grid Array**, New York: Wiley, 1995.
- [29] A. L. P. S. Campos, **Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e Projeto**, Natal - RN: IFRN, 2008.

- [30] D. B. Brito, L. M. Araújo, A. G. D'Assunção and R. H. C. Maniçoba, "A Minkowski fractal Frequency Selective Surface with high angular stability," *2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, Rio de Janeiro, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/IMOC.2013.6646577.
- [31] Sarika, Kumar, R., Tripathy, M. R., & Ronnow, D. (2017). "Fractal frequency selective surface based band stop filters for X-band and Ku-band applications." *2017 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication & Automation (ICACCA)* (Fall). doi:10.1109/icaccf.2017.8344692
- [32] Da Silva, M. R., Nóbrega, C. de L., Silva, P. H. da F., & D'Assunção, A. G. (2012). "Dual-polarized band-stop FSS spatial filters using vicsek fractal geometry." *Microwave and Optical Technology Letters*, 55(1), 31– 34, January 2013
- [33] Da Silva, M. R., Nóbrega, C. de L., Silva, P. H. da F., & D'Assunção, A. G. (2014). "Optimization of FSS with Sierpinski island fractal elements using population-based search algorithms and MLP neural network." *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(4), 827–831. doi:10.1002/mop.28214
- [34] J. C. Vardaxoglou, **Frequency Selective Surfaces - Analysis and Design**, England: Research Studies Press, 1997.
- [35] P. Harms, R. Mittra e W. Ko, "Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures," *IEEE Transactions on Antennas and*, vol. 42, pp. 1317-1324, Set 1994.
- [36] D. B. Webb, M. E. e R. Mittra, "Thick frequency selectives surfaces," em *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Chicago, IL, USA, 1992.
- [37] W. Tang, J. Zhu, C. Wang, J. Ge, Z. Yu e W. Zhuang, "Waveguide 3-D FSSs by 3-D printing technique,," em *International Conference on Electromagnetics in Advanced*, Cairns, QLD, 2016.
- [38] Fonte: V. P. Silva Neto, M. J. Duarte, M. R. M. L. Albuquerque and A. G. D'Assunção, "Analysis and design of fractal-like circular patch elements for miniaturized and stable FSSs," *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/IMOC.2015.7369045
- [39] S. N. Azemi, K. Ghorbani e W. S. T. Rowe, "A Reconfigurable FSS Using a Spring Resonator Element," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 781-784, 2013.

- [40] F. A. C. S. Lucena, M. R. T. Oliveira, C. P. N. .. L. Silva e M. T. Melo, "Controlled directivity and gain of antenna using square loop RFSS based on PIN diode," em *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aguas de Lindoia, 2017.
- [41] R. Martinez-Lopez, J. Rodriguez-Cuevas, A. Martynyuk e J. Martinez-Lopez, "An Active Ring Slot with RF Mems Switchable Radial Stubs for Reconfigurable Frequency Selective Surface Applications," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 128, pp. 419-440, 2012.
- [42] Q. Chen, S. Yang, J. Bai and Y. Fu, "Design of Absorptive/Transmissive Frequency-Selective Surface Based on Parallel Resonance," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 9, pp. 4897-4902, Sept. 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2722875.
- [43] Thirumal Murugan, J., Suresh Kumar, T. R., Salil, P., & Venkatesh, C. (2015). "Dual frequency selective transparent front doors for microwave oven with different opening areas," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 52, 11–16. doi:10.2528/pierl14121801.
- [44] 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)*, Aguas de Lindoia, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/IMOC.2017.8121131.
- [45] Z. Duan, G. Abomakhleb e G. Lu, "Perforated Medium Applied in Frequency Selective Surfaces and Curved Antenna Radome," *Applied Sciences*, vol. 9, p. 1081, 2019.
- [46] P. C. Kim, D. G. Lee, I. S. Seo e G. H. Kim, "Low-observable radomes composed of composite sandwich constructions and frequency selective surfaces," *Composites Science and Technology*, vol. 68, p. 2163–2170, 2008.
- [47] M. Gustafsson, A. Karlsson, A. P. P. Rebelo e B. Widenberg, "Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, n° 6, pp. 1897-1900, 2006.
- [48] G. Zarrillo e K. Aguiar, "Closed-form low frequency solutions for electromagnetic waves through a frequency selective surface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 35, n° 12, pp. 1406-1417, 1987.

- [49] S.-W. Lee, G. Zarrillo e C.-L. Law, “Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, n° 8, pp. 904-909, 1982.
- [50] S. Mahdi e M. Cenac, “Estimating Parameters of Gumbel Distribution using the Methods of Moments, probability weighted Moments and maximum likelihood,” *Revista de Matemática: Teoria y Aplicaciones*, vol. 12, p. 151–156, 2005.
- [51] D. Dault e B. Shanker, “A Mixed Potential MLFMA for Higher Order Moment Methods With Application to the Generalized Method of Moments,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, n° 2, pp. 650-662, 2016.
- [52] K. S. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, n° 3, pp. 302-307, 1966.
- [53] Q. Sun, Q. Ren, Q. Zhan e Q. H. Liu, “3-D Domain Decomposition Based Hybrid Finite-Difference Time-Domain/Finite-Element Time-Domain Method With Nonconformal Meshes,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, n° 10, p. 2017.
- [54] Á. F. M. Azevedo, **Método dos elementos finitos**, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [55] A. G. D. Júnior, G. Fontgalland, M. Titaouine, H. Baudrand e A. G. Neto, “Analysis of quasi-square open ring frequency selective surface using the Wave Concept Iterative Procedure,” em *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Bélem, 2009.
- [56] H. Megnafi, N. Boukli Hacene, A. Benomar, H. Baudrand e N. Raveu, “Analysis of microstrip cascaded quadruplet filters by a multi-scale wave concept iterative procedure (M.WCIP),” em *11th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, Hammamet, 2011.
- [57] A. A. Dewani, S. G. O’Keefe, D. V. Thiel e A. Galehdar, “Window RF Shielding Film Using Printed FSS,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, n° 2, pp. 790-796, 2018.
- [58] ESA, “Microwave Material RF Characterization Setup,” [Online]. Available: http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2014/09/Microwave_Material_RF_Characterization_setup. [Acesso em 03 setembro 2020].

- [59] “<https://datasheet.octopart.com/BAR6403WE6327HTSA1-Infineon-datasheet-86810074.pdf>,” Infineon, [Online]. Available: <https://datasheetspdf.com/pdf/179455/SiemensSemiconductorGroup/BAR64-03/1>. [Acesso em 02 setembro 2020].
- [60] “Design With PIN Diodes,” SkyWorks, 22 outubro 2012. [Online]. Available: https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/1-100/Design_With_PIN_Diodes_200312D.pdf. [Acesso em 01 setembro 2020].
- [61] Alexander, Charles K.; Sadiku, Matthew O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- [62] Coilcraft Inc., “Basic of design - Investigating Inductor Requirements for Power and RF/Microwaves Designs,” Electronic Design Magazine, March 2014. Available in: https://www.coilcraft.com/getmedia/0216fb39-cc39-4cd9-a5b21578ce1c204e/Doc1189_Coilcraft_Basics-of-Inductor-Selection.pdf
- [63] <https://www.coilcraft.com/en-us/products/rf/conical-broadband/0-6-ghz/4310lc/#>
- [64] AppCAD, disponível em <http://www.hp.woodshot.com/> , acessado em 19/04/2021
- [65] A.H. system. **Double Ridge Guide Horn Antenna SAS-571**.
“https://www.ahsystems.com/datasheets/SAS-571_Horn_Antenna_Datasheet.pdf”
- [66] Keysight Technologies, **E5071C ENA Vector Network Analyzer**, 2020.
“<https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01423/brochures/5989-5478.pdf>”