



Ianes Barbosa Grécia Coutinho

**DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM
FREQUÊNCIA ASSOCIANDO AS GEOMETRIAS DIPOLOS
CRUZADOS E MATRIOSKA**

**João Pessoa - PB
Fevereiro de 2020**

Ianes Barbosa Grécia Coutinho

**DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM
FREQUÊNCIA ASSOCIANDO AS GEOMETRIAS DIPOLOS
CRUZADOS E MATRIOSKA**

Dissertação de Mestrado submetido 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. Jefferson Costa e Silva

João Pessoa – PB, fevereiro de 2020
Ianes Barbosa Grécia Coutinho – ianesgrecia@gmail.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

C871d

Coutinho, Ianes Barbosa Grécia.

Desenvolvimento de superfícies seletivas em frequência associando as geometrias dipolos cruzados e matrioska / Ianes Barbosa Grécia Coutinho. – 2020.

84 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Costa e Silva.

1. Superfícies Seletivas em Frequência (FSS). 2. Geometria matrioska. 3. Dipolos cruzados. 4. Acoplamento entre geometrias. 5. Telecomunicações I. Título.

CDU 621.39

DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA ASSOCIANDO AS GEOMETRIAS DIPOLOS CRUZADOS E MATRIOSKA

Dissertação de Mestrado submetido 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 06/02/2020

BANCA EXAMINADORA


Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Orientador


Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Examinador Interno


Adaildo Gomes D'Assunção Junior, Dr. – IFPB
Examinador Externo


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

João Pessoa – PB
Fevereiro de 2020

RESUMO

Com o crescimento das redes de comunicação sem fio e as novas demandas dos sistemas de telecomunicações, as superfícies seletivas em frequência, FSS, vêm atraindo a atenção de vários grupos de pesquisa para diversas aplicações, tais como refletores, radomes, janelas eficientes, paredes eletromagneticamente inteligentes, entre outras. Em trabalhos recentes tem se implementado o uso da geometria matrioska nas FSS, tendo vantagens como miniaturização, operação de multibanda e forma independente de polarização. A geometria do dipolo cruzado também é aplicado devido a sua simplicidade e flexibilidade de banda de operação. Um dos desafios no projeto de FSS é quando são desejadas ressonâncias próximas, principalmente quando é desejado que a FSS apresente apenas uma camada de metalização. Neste caso, uma das soluções é associar diferentes geometrias para compor a geometria da célula unitária da FSS. Entretanto, para evitar o acoplamento entre as diferentes geometrias é preciso que as respectivas ressonâncias sejam decorrentes de distribuições de campos distintas. Desta forma, nesta dissertação é proposto o desenvolvimento de superfícies seletivas em frequência associando as geometrias dipolos cruzados e matrioska, atuando em três bandas de rejeição, com a banda central aplicada à faixa de frequência de 2,400-2,4835 GHz dos padrões IEEE 802.11b/g/n (Wi-Fi) e IEEE 802.15 (Bluetooth). São apresentados resultados numéricos, obtidos utilizando o software comercial ANSYS Designer que se baseia no Método dos Momentos, MoM, além de resultados experimentais, observando-se uma boa concordância entre eles. Foram realizadas medições comparativas com diferentes tamanhos de célula e dipolos cruzados, mostrando a independência da polarização e confirmando uma diminuição do acoplamento entre as geometrias.

Palavras chave: Superfícies Seletivas em Frequência; Geometria Matrioska; Dipolos Cruzados; Acoplamento entre geometrias; Independência de Polarização.

ABSTRACT

With the growth of wireless communication networks and the new demands of telecommunication systems, the frequency selective surfaces, FSS, have attracted the attention of various research groups for various applications such as reflectors, radomes, efficient windows, electromagnetically walled. intelligent, among others. In recent works the use of matryoshka geometry in FSS has been implemented, having advantages such as miniaturization, multiband operation and independent form of polarization. The cross dipole geometry is also applied due to its simplicity and flexibility of operating band. One of the challenges in FSS design is when close resonances are desired, especially when it is desired for FSS to have only one metallization layer. In this case, one of the solutions is to associate different geometries to compose the FSS unit cell geometry. However, to avoid coupling between the different geometries, the respective resonances must be derived from different field distributions. In this scenario, this dissertation proposes the development of frequency selective surfaces associating the cross dipoles and matryoshka geometries, acting in three reject bands, with the central band applied to the frequency band of 2,400-2,4835 GHz of the IEEE 802.11b/g/n (Wi-Fi) and IEEE 802.15 (Bluetooth) standards. Numerical results are presented, obtained using the ANSYS Designer commercial software that is based on the Method of Moments, MoM, and experimental results, observing a good agreement between them. Comparative measurements were performed with different cell sizes and cross dipoles, showing the polarization independence and confirming a decreased coupling between the geometries.

Keywords: Frequency Selective Surfaces; Matryoshka geometry; Cross dipoles geometry; Coupling between geometries; Polarization Independence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de aplicações no espectro de frequência.....	15
Figura 2 – Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços.....	16
Figura 3 – Geometrias estrela de quatro braços e matrioska	17
Figura 4 – Bonecas russas matrioska	17
Figura 5 – FSS com múltiplas geometrias	18
Figura 6 – Geometria matrioska com dipolos cruzados.....	19
Figura 7 – Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS	20
Figura 8 – FSS do tipo <i>patch</i>	21
Figura 9 – FSS do tipo abertura	21
Figura 10 – Elementos do grupo 1	22
Figura 11 – Elementos do grupo 2.....	22
Figura 12 – Elementos do grupo 3.....	23
Figura 13 – Elementos do grupo 4.....	23
Figura 14 – Geometrias investigadas no GTEMA-IFPB.....	23
Figura 15 – Exemplos de FSS passiva.....	24
Figura 16 – Exemplos de FSS reconfiguráveis.....	24
Figura 17 – FSS do tipo anteparo fino	25
Figura 18 – FSS com duas camadas de metalização.....	26
Figura 19 – FSS utilizada como anteparo na porta do forno de micro-ondas.....	26
Figura 20 – Antena de banda dupla com sub-refletor usando FSS.....	27
Figura 21 – Radome utilizando FSS	27
Figura 22 – Janela eficiente utilizando FSS.....	28
Figura 23 –Configuração para caracterização experimental da FSS com antenas corneta.....	30
Figura 24 –Configuração para caracterização experimental da FSS com antenas corneta e lentes	30
Figura 25 –Configuração para caracterização experimental da FSS em câmara anecóica.....	31
Figura 26 –Configuração para caracterização experimental de FSS com antenas corneta e lentes	31
Figura 27 –Geometria dipolo cruzado	32
Figura 28 – Geometria matrioska utilizada.....	34
Figura 29 –Arranjo de dipolos cruzados	36
Figura 30 – Célula unitária considerada para FSS.....	36
Figura 31 – Célula unitária com dipolo cruzado e matrioska	37

Figura 32 – Célula unitária da geometria de dipolos cruzados utilizada na simulação	38
Figura 33 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , dipolos cruzados, FSS 1	39
Figura 34 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , dipolos cruzados, FSS 2	40
Figura 35 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , dipolos cruzados, FSS 3	40
Figura 36 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , dipolos cruzados, FSS 4	41
Figura 37 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , dipolos cruzados, FSS 1	42
Figura 38 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , dipolos cruzados, FSS 2	42
Figura 39 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , dipolos cruzados, FSS 3	43
Figura 40 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , dipolos cruzados, FSS 4	43
Figura 41 – Célula unitária da geometria matrioska utilizada na simulação	44
Figura 42 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , matrioska, FSS 5	45
Figura 43 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , matrioska, FSS 6	46
Figura 44 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , matrioska, FSS 7	46
Figura 45 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , matrioska, FSS 8	47
Figura 46 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , matrioska, FSS 5	48
Figura 47 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , matrioska, FSS 6	48
Figura 48 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , matrioska, FSS 7	49
Figura 49 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , matrioska, FSS 8	49

Figura 50 – Células das FSS	50
Figura 51 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , geometrias associadas, FSS 9	51
Figura 52 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , geometrias associadas, FSS 10	52
Figura 53 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , geometrias associadas, FSS 11	52
Figura 54 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , geometrias associadas, FSS 12	53
Figura 55 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , geometrias associadas, FSS 9	54
Figura 56 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , geometrias associadas, FSS 10	54
Figura 57 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , geometrias associadas, FSS 11	55
Figura 58 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , geometrias associadas, FSS 12	55
Figura 59 – Fotografias da configuração utilizada na caracterização experimental.....	57
Figura 60 –Fotografia das FSS fabricadas	57
Figura 61 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 0^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm)	59
Figura 62 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 15^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm).....	60
Figura 63 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 30^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm).....	60
Figura 64 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 45^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm).....	61
Figura 65 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 0^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm).....	61
Figura 66 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 15^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm).....	62
Figura 67 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 30^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm).....	62

Figura 68 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 45^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm).....	63
Figura 69 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 0^\circ$, FSS 10 (40 mm \times 40 mm).....	64
Figura 70 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 15^\circ$, FSS 10 (40 mm \times 40 mm).....	65
Figura 71 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 30^\circ$, FSS 10 (40 mm \times 40 mm).....	65
Figura 72 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 45^\circ$, FSS 10 (40 mm \times 40 mm).....	66
Figura 73 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 0^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm).....	67
Figura 74 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 15^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm).....	67
Figura 75 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 30^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm).....	68
Figura 76 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 45^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm).....	68
Figura 77 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 0^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm).....	69
Figura 78 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 15^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm).....	69
Figura 79 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 30^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm).....	70
Figura 80 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 45^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm).....	70
Figura 81 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 0^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm).....	72
Figura 82 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 15^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm).....	72
Figura 83 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 30^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm)	73

Figura 84 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 45^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm).....	73
Figura 85 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 0^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm).....	74
Figura 86 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 15^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm).....	74
Figura 87 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 30^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm).....	75
Figura 88 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 45^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm).....	75
Figura 89 – Frequência de ressonância \times Comprimento dos dipolos cruzados.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões da geometria dipolos cruzados utilizada em cada FSS	39
Tabela 2 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização x , geometria dipolos cruzados.....	41
Tabela 3 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização y , geometria dipolos cruzados.....	44
Tabela 4 – Dimensões da geometria matrioska	45
Tabela 5 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização x , geometria matrioska.....	47
Tabela 6 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização y , geometria matrioska.....	50
Tabela 7 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização x , geometria associadas.....	53
Tabela 8 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização y , geometria associadas.....	56
Tabela 9 – Comparação dos resultados numéricos com os experimentais, geometrias associadas, FSS 9 (30 mm \times 30 mm).....	64
Tabela 10 – Comparação dos resultados numéricos com os experimentais, geometrias associadas, FSS 10 (40 mm \times 40 mm).....	66

LISTA DE SIGLAS

ANSYS	<i>Analysis Systems</i>
CWP	<i>Coplanar Waveguide</i> (Guia de Ondas Coplanar)
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i> (Diferenças Finitas no Domínio do Tempo)
FEM	<i>Finite-Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i> (Superfície Seletiva em Frequência)
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)
M2M	<i>Machine-to-Machine</i> (Máquina a Máquina)
MoM	<i>Method of Moments</i> (Método dos Momentos)
RF	Rádio Frequência
RFSS	<i>Reconfigurable Frequency Selective Surface</i> (Superfície Seletiva em Frequência Reconfiguráveis)
WCIP	<i>Wave Concept Iterative Procedure</i> (Método Iterativo das Ondas)
λ_0	Comprimento da onda no espaço livre
C	Capacitância
d_x	Distância da lateral da matrioska até o espaçamento g ao longo do eixo x
d_y	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 dielétrico
$\epsilon_{ref(dip)}$	Constante dielétrica efetiva do dipolo cruzado
$\epsilon_{ref(CPW)}$	Constante dielétrica efetiva de uma guia de ondas coplanar
$\epsilon_{ref(MS)}$	Constante dielétrica efetiva de uma microfita
g	Espaçamento que secciona as laterais do anel matrioska

	Espaçamento entre os dipolos
h	Espessura do substrato dielétrico
L	Indutância
L_{ef}	Comprimento efetivo da frequência de ressonância
L_{dip}	Comprimento da faixa do dipolo cruzado
L_x	Comprimento do lado da matrioska ao longo do eixo x
L_y	Comprimento do lado da matrioska ao longo do eixo y
S21	Parâmetro S, equivalente ao coeficiente de transmissão
t	Espessura da camada de metalização
W	Largura das fitas que compõem os anéis da matrioska
	Largura dos dipolos
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	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. Classificação de FSS.....	20
2.1.1. Preenchimento do elemento básico.....	21
2.1.2. Geometria do elemento básico.....	22
2.1.3. FSS passivas e FSS reconfiguráveis	24
2.1.4. Espessura da camada de metalização.....	25
2.2. Aplicações das FSS.....	26
2.3. Técnicas de Análise	28
2.3.1. Caracterização numérica.....	28
2.3.2. Caracterização experimental.....	29
3. DESCRIÇÃO DE PROJETO	32
3.1. Geometrias propostas.....	32
3.1.1. Geometria dipolos cruzados.....	32
3.1.2. Geometria matrioska independente de polarização	33
4. RESULTADOS	38
4.1. Análise numérica das FSS com geometrias isoladas e com geometrias associadas	38
4.1.1. Análise numérica das FSS com geometria dipolos cruzados.....	38
4.1.2. Análise numérica da FSS com geometria matrioska	44
4.1.3. Análise numérica das FSS com geometrias associadas	50
4.2. Caracterização experimental das FSS com associadas	56
4.3. Análise do acoplamento entre as geometrias associadas	76
5. CONCLUSÃO	78
5.1. Conclusões	78
5.2. Trabalhos futuros	79
5.3. Trabalhos Publicados	79
REFERÊNCIAS	80

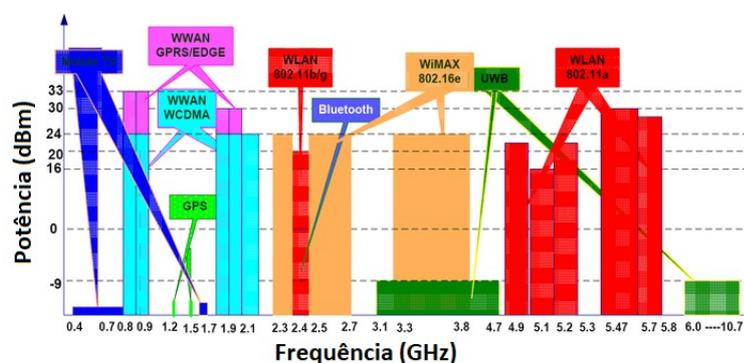
CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos observa-se um grande crescimento no uso de serviços móveis de telecomunicações. Um dos principais fatores desse crescimento é o desenvolvimento massivo e diverso de dispositivos portáteis, como, por exemplo, *smartphones*, *tablets*, *notebooks*, *e-books readers*, consoles para jogos eletrônicos, entre outros. Esse desenvolvimento tem proporcionado uma verdadeira revolução em diversas áreas da atuação humana, citando-se as interações sociais, educação, saúde, comércio, entre outros. A maior parte dessas aplicações faz uso de conexões via Internet, provocando um aumento da demanda por taxas de transmissão. Considere-se ainda serviços como vídeo *streaming*, comunicação máquina a máquina (M2M, *Machine-to-machine*) e a diversificação da Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*), fatores que efetivamente contribuem para o crescimento da demanda por taxas de transmissão cada vez mais elevadas [1],[2].

Essa proliferação de redes sem fio tem provocado novas demandas para os sistemas de telecomunicações, pois proporciona uma maior competição pela utilização do espectro de frequência, desde 700 MHz até 28GHz [3], com diversas aplicações em diferentes faixas de frequência, Figura 1, algumas das quais intensamente utilizadas, tais como as faixas de 2,4 GHz e 5,8 GHz. Neste contexto, impõe-se a necessidade de desenvolver dispositivos que operem em múltiplas faixas de frequência, assim como otimizar a utilização das faixas de frequência disponíveis [3],[4].

Figura 1 – Ilustração de aplicações no espectro de frequência



Fonte: [4]

Com essas demandas, a disponibilidade de torres e áreas de instalação de antenas é uma limitação e vários sistemas de telecomunicações são obrigados a compartilhar o mesmo espaço, mesmo tendo potências e frequências distintas que possam causar interferência entre os sinais [4], Figura 2.

Além da disponibilidade de espaço existem ambientes (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]-[8].

Figura 2 – Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços

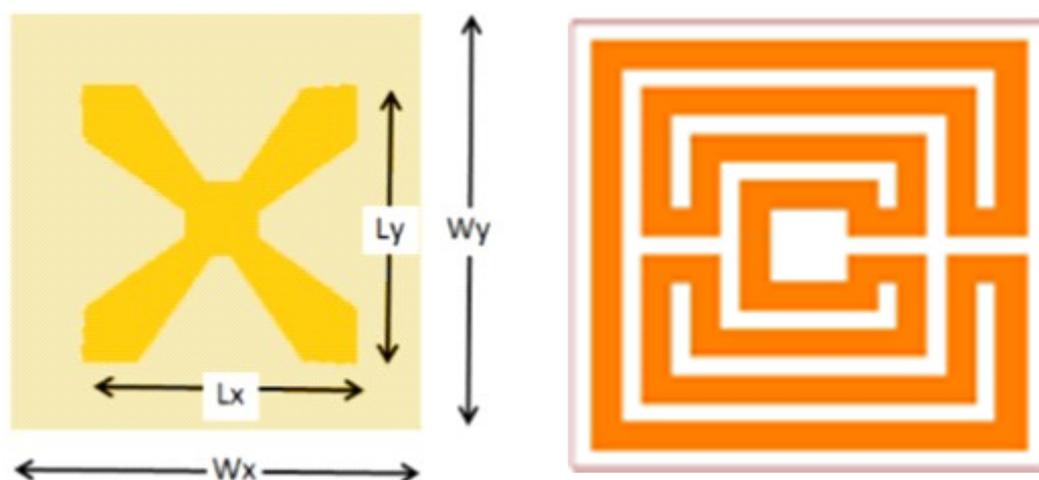


Fonte: [5]

Para limitar essas interferências e maximizar a utilização do espaço e de antenas, uma das opções que vêm sendo adotada é a utilização de superfícies seletivas em frequência, FSS (*Frequency Selective Surfaces*), o que vem sendo investigado por diversos grupos de pesquisa [9]-[15] e é abordada nesta dissertação.

Em trabalhos desenvolvidos no GTEMA/IFPB, Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, do Instituto Federal da Paraíba, foram desenvolvidas FSS utilizando diferentes geometrias, como a estrela de quatro braços e a matrioska, Figura 3 [9],[16].

Figura 3 – Geometrias estrela de quatro braços e matrioska



(a) Geometria estrela de quatro braços

Fonte: [9]

(b) Geometria de matrioska

Fonte: [16]

A geometria matrioska é baseada nas bonecas russas de mesmo nome, onde uma boneca maior contém uma boneca menor, que contém outra boneca menor, assim sucessivamente, porém, todas ocupando apenas o volume da boneca maior, Figura 4 [10].

Figura 4 – Bonecas russas matrioska

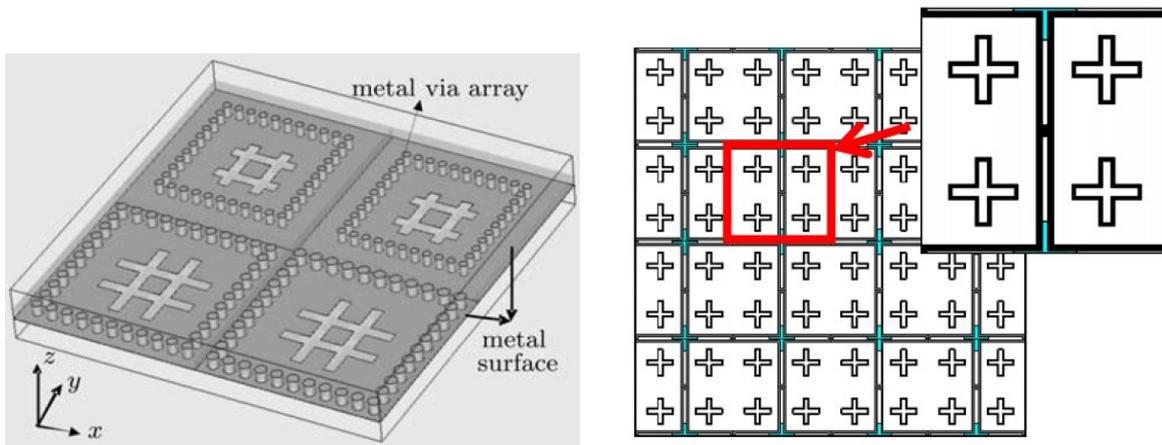


Fonte: [17]

Diferentemente dos anéis concêntricos, na geometria matrioska os anéis permanecem interligados, o que aumenta o seu comprimento efetivo, reduzindo a sua frequência de ressonância e apresentando características de miniaturização e operação multibanda [18],[19]. Inicialmente, essa geometria era dependente da polarização, entretanto, mais recentemente, foi apresentada uma configuração independente da polarização [20].

Uma das maneiras de obter respostas em frequência específicas é associar geometrias de diferentes dimensões em uma mesma FSS, Figura 5. 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 [21],[22].

Figura 5 – FSS com múltiplas geometrias

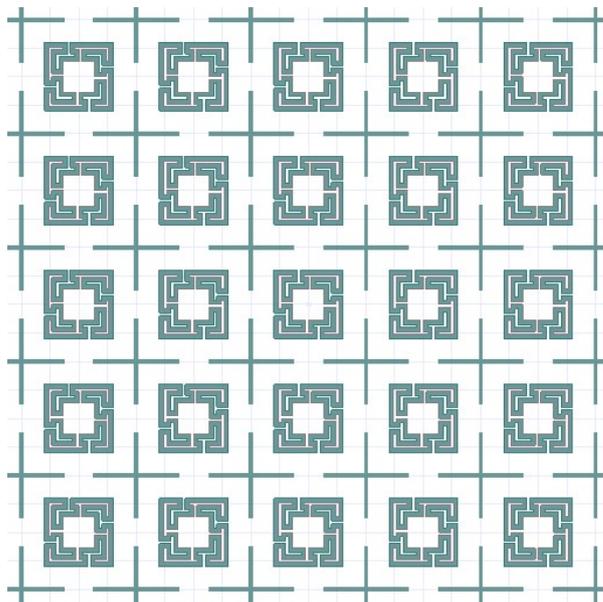


(a) Geometria de *Hash* com SIW
Fonte: [21]

(b) Geometria de dipolos cruzados de diferentes tamanhos
Fonte: [22]

Uma alternativa para superar essa limitação é a utilização de geometrias de diferentes naturezas, como por exemplo os dipolos e a geometria matrioska em uma mesma FSS, como proposta nesta dissertação, Figura 6. Dessa forma, como as distribuições de campo para a ressonância de cada geometria são distintas, minimiza-se o acoplamento, possibilitando uma maior flexibilidade de projeto.

Figura 6 – Geometria matrioska com dipolos cruzados



Fonte: Autor

Este trabalho é dividido da seguinte forma:

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos sobre as FSS, sendo descritos seus parâmetros e características como espessura, comprimento e substrato, assim como grupos de geometrias e classificações. Também são descritas as principais técnicas de análise e aplicações.

A descrição do projeto das FSS dessa dissertação é realizada no Capítulo 3, com a apresentação de cada geometria e suas equações iniciais de projeto.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos após a caracterização numérica e experimental das estruturas.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido e também sugestões de trabalhos futuros para a continuidade desta pesquisa.

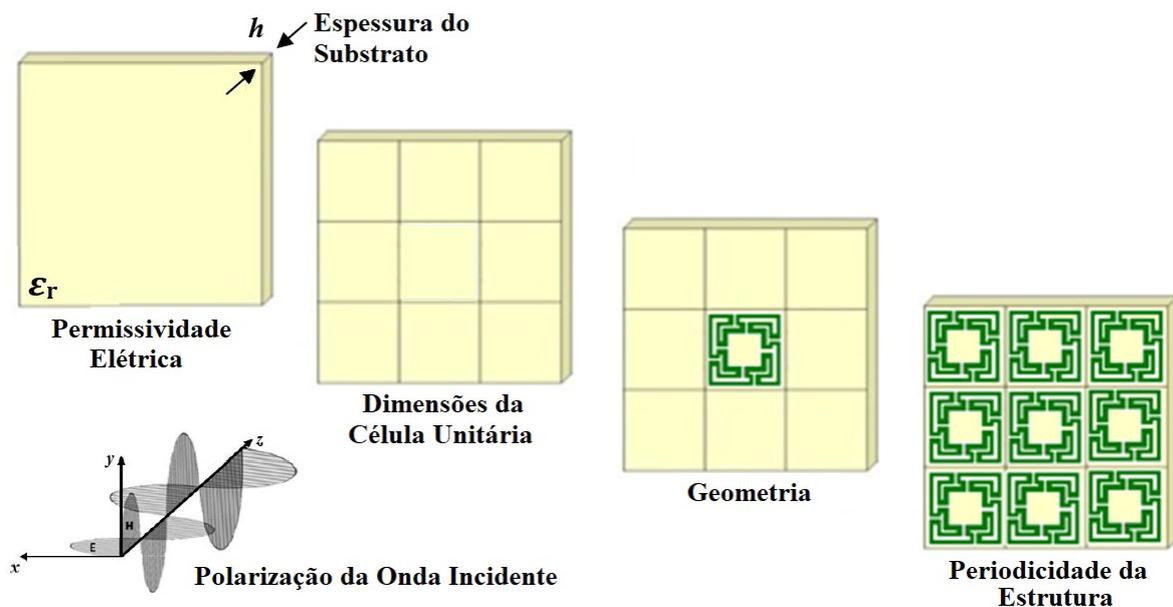
CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Basicamente, as superfícies seletivas em frequência, FSS (*frequency selective surfaces*) são arranjos periódicos planares gravados na superfície de um substrato dielétrico, de espessura h e constante dielétrica ϵ_r , que possuem comportamento similar aos filtros, se subdividindo em rejeita-faixa ou passa-faixa, a depender dos tipos de elementos utilizados. [23],[24].

Dentro os fatores que influenciam a resposta em frequência da FSS, podem ser citados espessura e constante dielétrica do substrato, dimensões da célula unitária, geometria utilizada, periodicidade da estrutura e polarização da onda incidente, Figura 7.

Figura 7 – Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS



Fonte: Autor

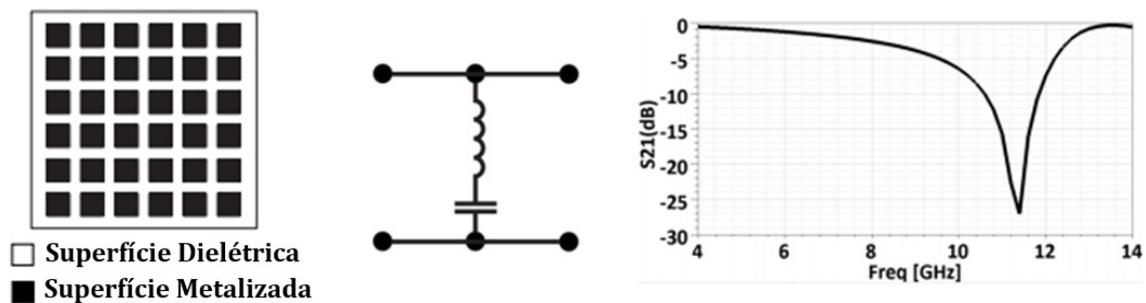
2.1. Classificação de FSS

As FSS podem ser classificadas de diferentes formas. A seguir são apresentadas algumas dessas classificações.

2.1.1. Preenchimento do elemento básico

As FSS podem ser classificadas de acordo a forma com a qual seu elemento básico é preenchido. A FSS é do tipo *patch*, quando a célula unitária é composta por uma superfície dielétrica e o elemento básico é um *patch* metálico, Figura 8. Neste caso, a FSS se comporta como um circuito LC em série, com características de um filtro rejeita-faixa, ou seja, quando uma onda incide sobre a estrutura e os elementos impressos entram em ressonância, a FSS reflete a onda incidente [23]-[25]

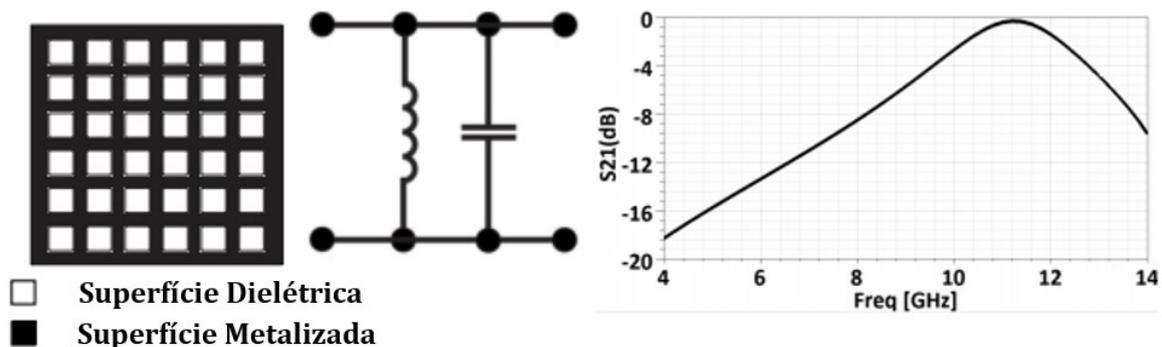
Figura 8 – FSS do tipo *patch*



Fonte: [25]

Já nas estruturas do tipo abertura, ou *slot*, Figura 9, 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, se tornam praticamente “transparentes” para a onda incidente, resultando na transmissão da onda incidente [23],[24].

Figura 9 – FSS do tipo abertura



Fonte: [25]

2.1.2. 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 [23], [24].

Grupo 1: formado pelos elementos do tipo N-polos conectados pelo centro, Figura 10. Exemplos: dipolo fino, dipolo cruzado, tripolo e a cruz de Jerusalém

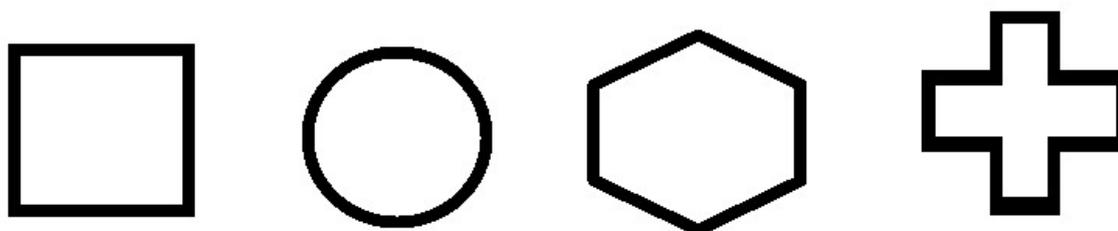
Figura 10 – Elementos do grupo 1



Fonte: [23]

Grupo 2: formado pelos elementos do tipo espiras, Figura 11. Exemplos: espira quadrada, espira circular, espira hexagonal, espira em cruz e espira de três braços

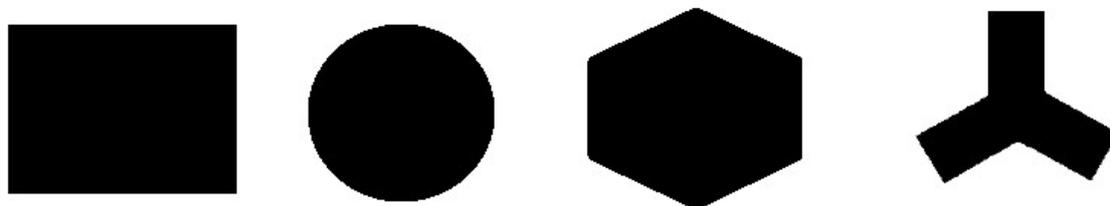
Figura 11 – Elementos do grupo 2



Fonte: [23]

Grupo 3: reúne os elementos de interior sólido, Figura 12. Exemplos: *patches* quadrados, retangulares, circulares e hexagonais.

Figura 12 – Elementos do grupo 3



Fonte: [23]

Grupo 4: reúne os elementos composto a partir da combinações de dois ou três elementos pertencentes aos outros grupos anteriores, Figura 13.

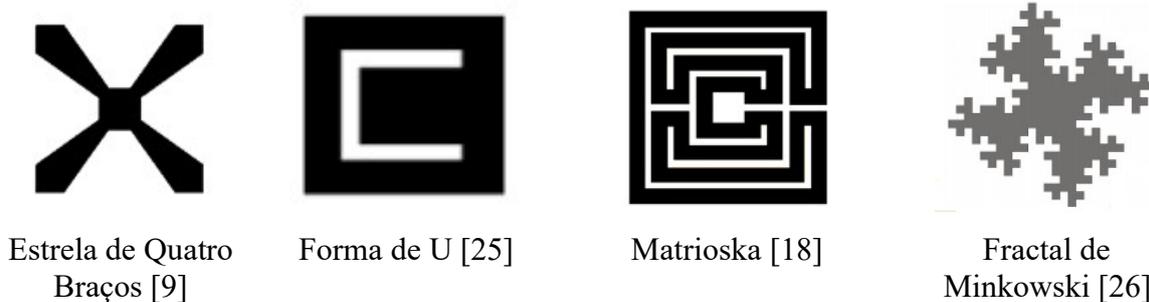
Figura 13 – Elementos do grupo 4



Fonte: [23]

No GTEMA-IFPB vem sendo realizados estudos no sentido de identificar geometrias a serem implementadas em FSS. As geometrias matrioska, a estrela de quatro braços, em forma de U e fractal são exemplos dessas geometrias investigadas, Figura 14 [9],[18],[25],[26].

Figura 14 – Geometrias investigadas no GTEMA-IFPB



Estrela de Quatro
Braços [9]

Forma de U [25]

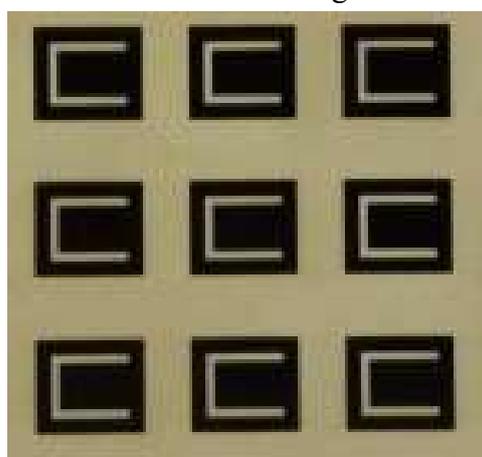
Matrioska [18]

Fractal de
Minkowski [26]

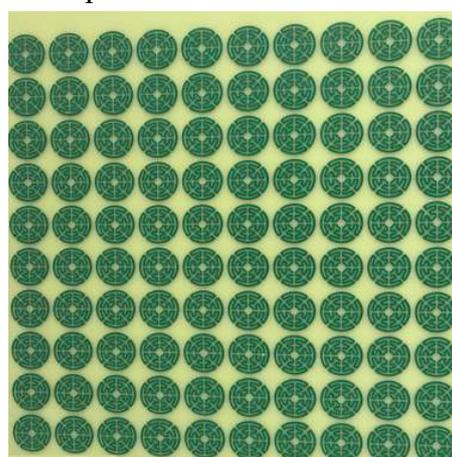
2.1.3. FSS passivas e FSS reconfiguráveis

As FSS também podem ser classificadas em passivas, ou simplesmente FSS, e FSS reconfiguráveis, RFSS. As FSS passivas apresentam uma resposta em frequência fixa e têm como vantagens as facilidades de projeto e fabricação, Figura 15. Já as RFSS podem ter a sua resposta em frequência modificada, podendo essa modificação ser tanto mecânica, Figura 16, como eletrônica, através da incorporação de dispositivos ativos (diodos PIN, varactores, chaves MEMs, etc.) [29].

Figura 15 – Exemplos de FSS passiva



(b) FSS passiva com geometria em forma de U
Fonte: [25]

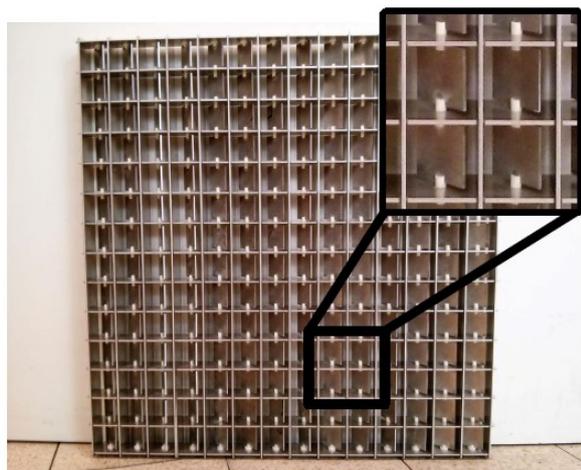


(b) FSS passiva de matrioska circular
Fonte: [10]

Figura 16 – Exemplos de FSS reconfiguráveis



(a) FSS reconfigurável com geometria em forma de anéis de dupla polarização
Fonte: [28]

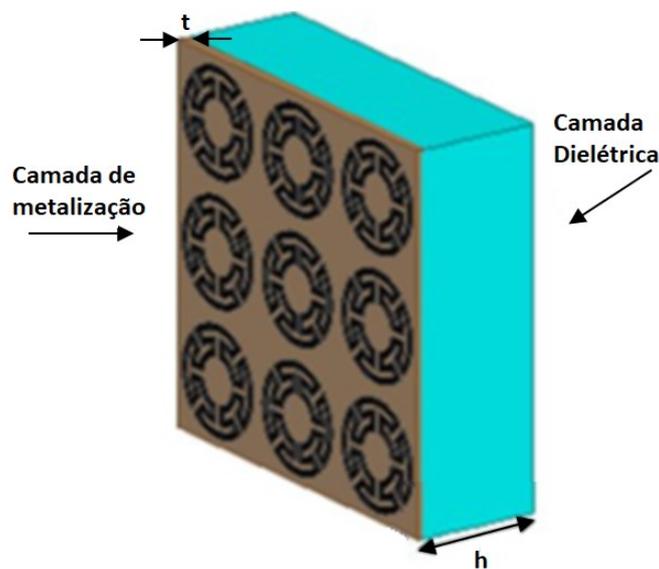


(b) FSS de *patch* quadrado mecanicamente reconfigurável
Fonte: [29]

2.1.4. 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 do uso de FSS de anteparo fino se dá não apenas pela minimização do espaço, mas também pelo baixo custo de fabricação [23],[24].

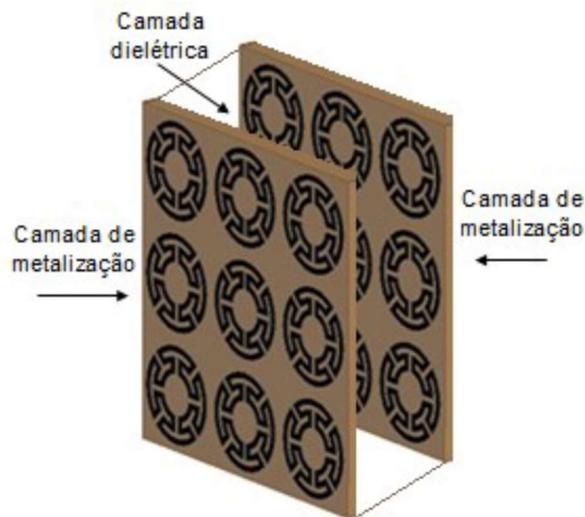
Figura 17 – FSS do tipo anteparo fino



Fonte: [10]

As FSS de anteparo espesso possuem uma camada de metalização mais espessa ou uma segunda camada de metalização separada da primeira por uma camada dielétrica, Figura 18. Apesar das desvantagens do custo fabricação e do maior volume, as FSS de anteparo espesso ou de FSS empilhadas com duas ou mais camadas têm a vantagem de uma transição mais rápida da banda passante para a banda de rejeição, *roll-off*, e banda passante mais plana [28][29].

Figura 18 – FSS com duas camadas de metalização



Fonte: [10]

2.2. Aplicações das FSS

As FSS têm aplicações nas mais diversas faixas de frequências, desde RF até terahertz. Uma das aplicações mais conhecida é o anteparo da porta do forno de micro-ondas doméstico, Figura 19, que deixa passar a faixa de luz visível enquanto reflete as ondas produzidas pela válvula de micro-ondas (em torno de 2,45 GHz), permitindo que o alimento que está sendo processado seja visto.

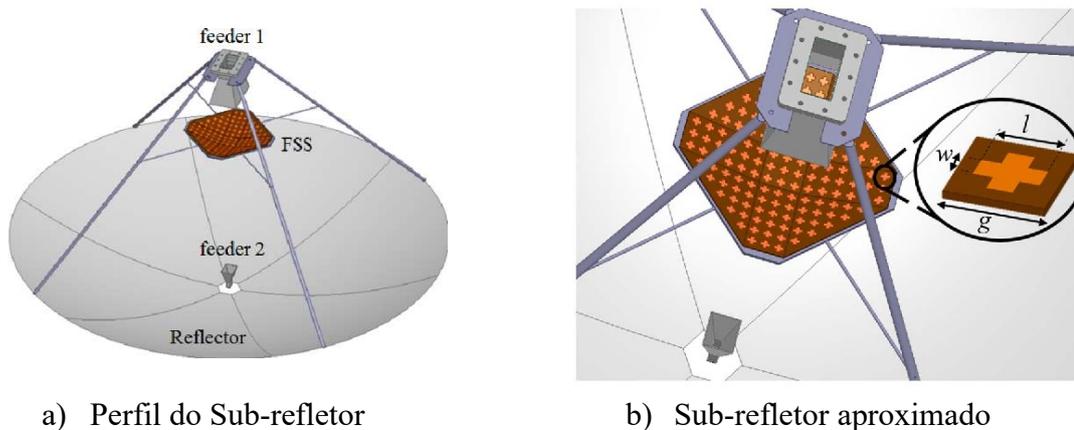
Outra aplicação são as antenas de banda dupla onde a FSS é utilizada como sub-refletor, Figura 20 [32]-[34].

Figura 19 – FSS utilizada como anteparo na porta do forno de micro-ondas



Fonte: [34]

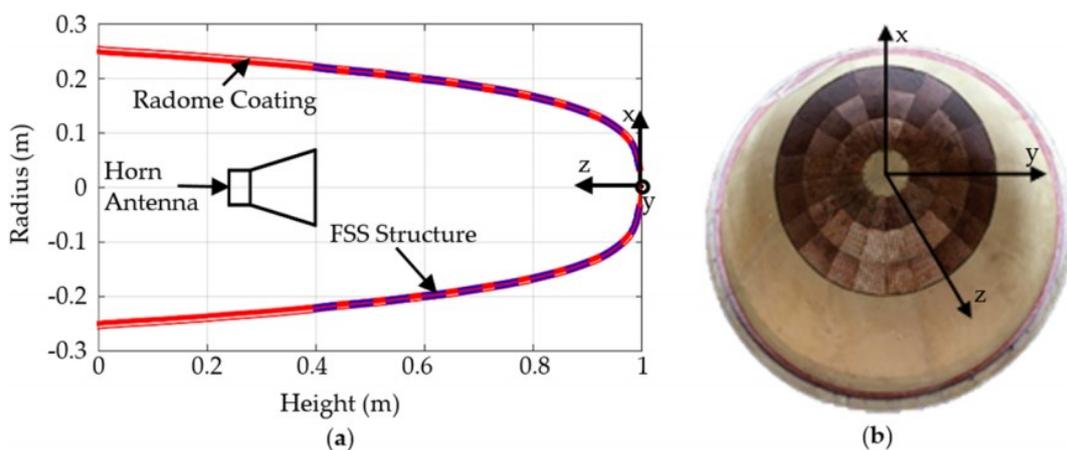
Figura 20 – Antena de banda dupla com sub-refletor usando FSS



Fonte: [32]

O radome é mais uma das aplicações em que as FSS podem ser utilizadas. Neste caso eles são usados para proteger o sistema de antenas (normalmente antenas de radar) 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 21 é possível minimizar essa degradação de sinal [33].

Figura 21 – Radome utilizando FSS



(a) Seção transversal mediana geométrica do radome

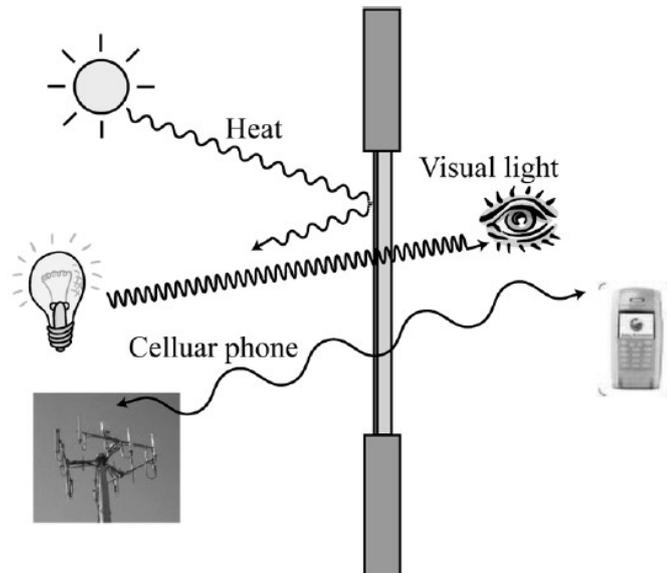
(b) Foto interna do radome

Fonte: [33]

Outras aplicações estão em construções como casas e prédios, com janelas e paredes revestidas com FSS. A FSS de uma janela eficiente, Figura 22, 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 no espectro tanto visível quanto da telefonia celular, não aparecendo como um ponto estético nem sendo um obstáculo para os sinais de telefonia móvel e internet. [12]

Figura 22 – Janela eficiente utilizando FSS



Fonte: [12]

Além dessas aplicações ainda podem ser citadas paredes inteligentes, otimizando os sinais de um ambiente interno, prédios eletromagneticamente inteligentes, e filmes de blindagem RF para janelas, todos estes usando as FSS [13]-[15].

2.3. Técnicas de Análise

2.3.1. Caracterização numérica

Existem diversas técnicas utilizadas para analisar as FSS. Inicialmente, alguns autores desenvolveram fórmulas simples e aproximadas que determinam as características de transmissão e de reflexão para as FSS tipo *patches* condutores ou aberturas com geometria retangular, sendo que essas fórmulas possuem limitações para algumas aplicações específicas, podendo apresentar resultados imprecisos, principalmente para geometrias mais complexas e ressonâncias de ordem superior [34]-[36].

Com o aumento da disponibilidade de recursos computacionais, foi possível implementar métodos numéricos, tais como o Método dos Momentos (*Method of Moments - MoM*), o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Difference Time Domain - FDTD*), o Método dos Elementos Finitos (*Finite-Element Method - FEM*), Método Iterativo das Ondas (*Wave Concept Iterative Procedure - WCIP*), dentre outros[37]-[44].

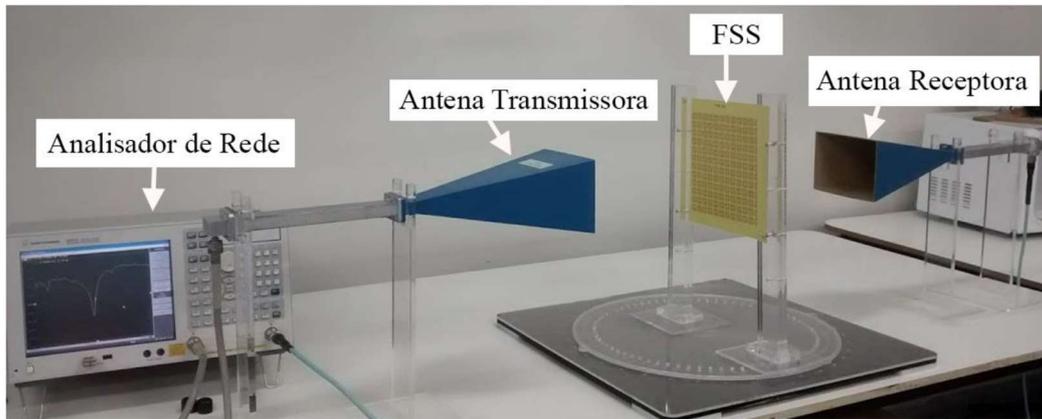
Na parte inicial desse trabalho, as simulações foram realizadas através da utilização do *software* comercial ANSYS Designer, ferramenta CAD (Projeto Assistido por Computador) para circuitos e simulações em micro-ondas, que utiliza como princípio de funcionamento o Método dos Momentos (MoM). Neste método, as correntes de superfície são usadas para modelar o *patch* de microfita e as correntes de polarização volumétricas são usadas para modelar os campos ao longo do substrato dielétrico. O MoM é baseado em equações integrais dos potenciais eletromagnéticos, que são transformadas em equações algébricas e podem ser resolvidas numericamente. Além disso, leva em conta o efeito das ondas de superfície fora do limite físico do *patch* bidimensional, provendo uma solução mais exata [45].

2.3.2. 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.

A configuração de medição mais básica para determinar as propriedades de transmissão ou reflexão de uma FSS segue o modelo apresentado na Figura 23, com antenas diretivas, neste caso do tipo corneta, de ganhos padronizados. A FSS é posicionada entre as duas antenas onde uma delas será a receptora e a outra transmissora. 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 questão. 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 que foi medida a polarização y [9],[10].

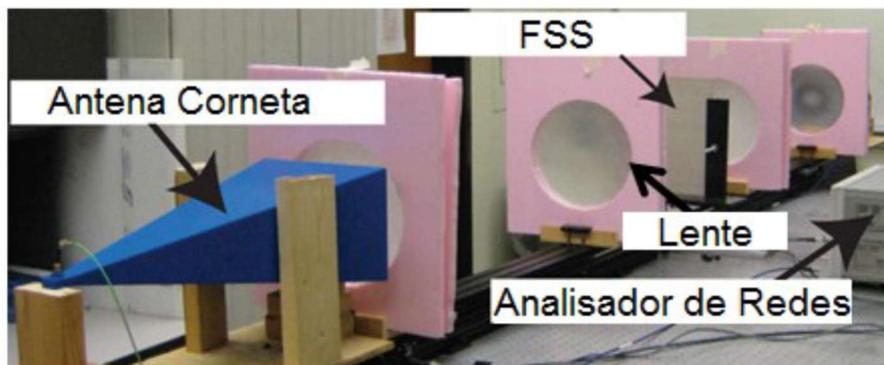
Figura 23 –Configuração para caracterização experimental da FSS com antenas corneta



Fonte: [9]

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. Algumas configurações ou artifícios podem ser utilizados para minimizar tais efeitos indesejados, como por exemplo, o uso de lentes em conjunto com as antenas para focar o feixe de onda no centro da FSS, Figura 24.

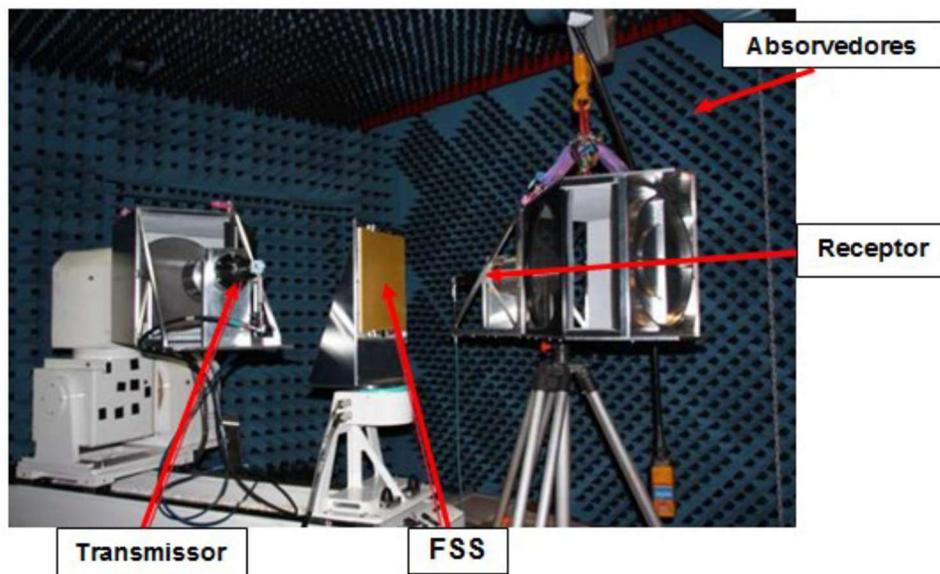
Figura 24 –Configuração para caracterização experimental da FSS com antenas corneta e lentes



Fonte: [10]

Uma das configurações mais precisas é a utilização de uma câmara anecóica, Figura 25, que utiliza absorvedores e garante um ambiente praticamente livre de interferências [46], mas esta configuração não é facilmente disponível devido a seu custo.

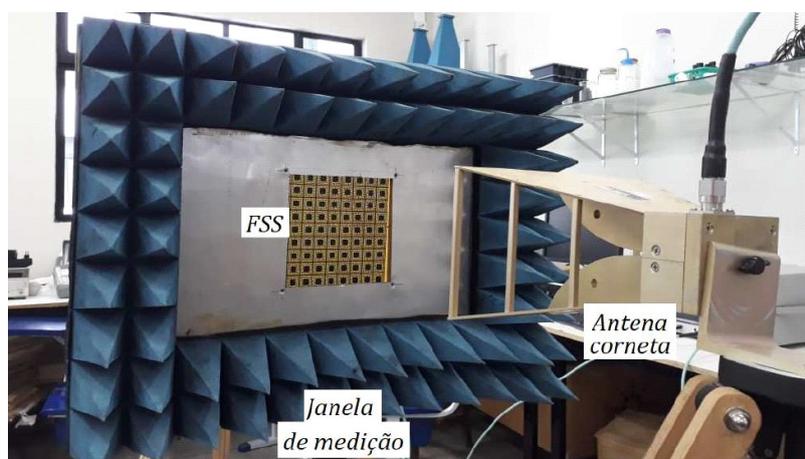
Figura 25 –Configuração para caracterização experimental da FSS em câmara anecóica



Fonte: [9]

Uma aproximação mais adaptável é encontrada usando painéis absorvedores semelhantes aos usados em câmeras anecóicas, formando uma janela de medição que minimiza o efeito de difração nas bordas da FSS, como mostrado na Figura 26. Este tipo de configuração foi utilizado na caracterização experimental realizada neste trabalho.

Figura 26 –Configuração para caracterização experimental de FSS com antenas corneta e lentes



Fonte: [10]

CAPÍTULO 3

3. DESCRIÇÃO DE PROJETO

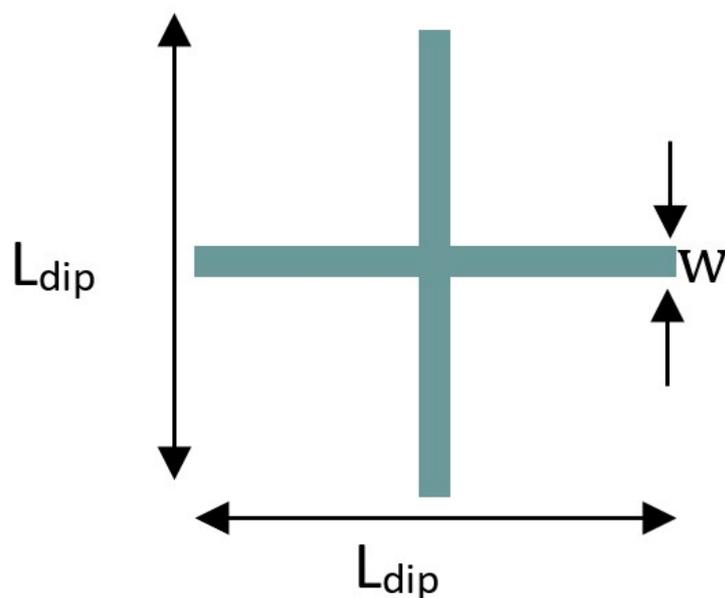
3.1. Geometrias propostas

A geometria proposta é obtida da associação da geometria matrioska com os dipolos cruzados. Foram projetadas quatro FSS variando o comprimento da geometria dipolo cruzado, mas mantendo a geometria matrioska constante.

3.1.1. Geometria dipolos cruzados

A geometria do dipolo cruzado utilizado nesta dissertação é bastante simples, para a qual a frequência de ressonância ocorre quando o seu comprimento é aproximadamente a metade do comprimento de onda guiado, Figura 27. É uma estrutura do tipo *patch* e terá as características de um filtro rejeita-faixa, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 27 –Geometria dipolo cruzado



Fonte: Autor

Para o cálculo das dimensões do dipolo, são propostas as equações a seguir:

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

Sendo f_{res} a frequência de ressonância desejada, $\epsilon_{ref}(dip)$ é dada por

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

Onde: $\epsilon_{ref}(MS)$ é a constante dielétrica efetiva de uma microfita, considerando a largura da fita igual à largura w do dipolo e espessura igual à espessura do dielétrico h .

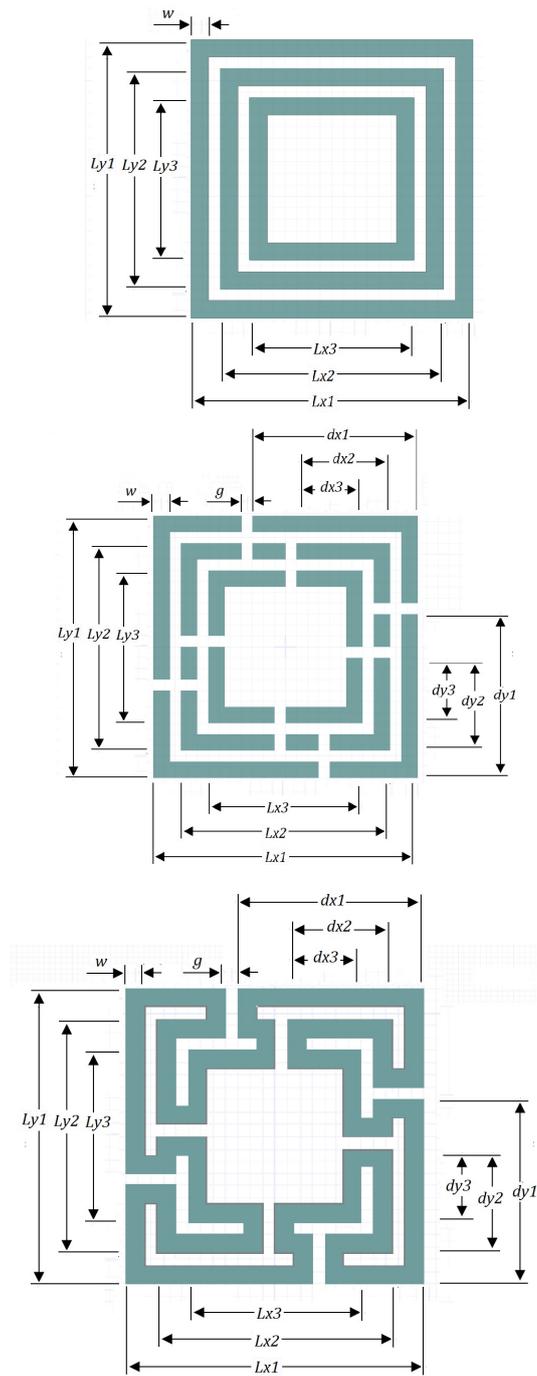
$\epsilon_{ref}(CPW)$ é a constante dielétrica efetiva de uma guia de ondas coplanar (CPW) sem plano terra, onde a largura da fita central é igual à largura do dipolo w e o espaçamento entre a fita central e os planos coplanares é $10h$.

Os valores de $\epsilon_{ref}(MS)$ e $\epsilon_{ref}(CPW)$ podem ser calculados utilizando aplicativos como o AppCAD [47].

3.1.2. Geometria matrioska independente de polarização

Diferentemente dos anéis concêntricos, na geometria matrioska os anéis permanecem interligados, aumentando o seu comprimento efetivo, apresentando, conseqüentemente, características de miniaturização e operação multibanda. Entretanto, na sua configuração original [10],[16], essa geometria é dependente da polarização. A geometria matrioska utilizada nesta dissertação é uma variação das utilizadas em [20] exibindo as vantagens de tamanho reduzido e operação de multibanda, além da independência da polarização. A geometria começa com anéis concêntricos, L_x e L_y . Em seguida os anéis concêntricos recebem fendas. Por fim, os anéis são interligados, formando um só anel, como mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Geometria matrioska utilizada



Fonte: Autor

A geometria apresentada na Figura 28 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 estrutura é geralmente um processo iterativo, baseado na experiência do projetista, onde a partir de um valor inicial é realizada uma otimização numérica. Entretanto, equações que estabeleçam o valor inicial das frequências de ressonância podem auxiliar no projeto das FSS.

Baseado na experiência acumulada no GTEMA-IFPB, para estimar as primeiras frequências de ressonância da geometria matrioska, utilizam-se as seguintes expressões:

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

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

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

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

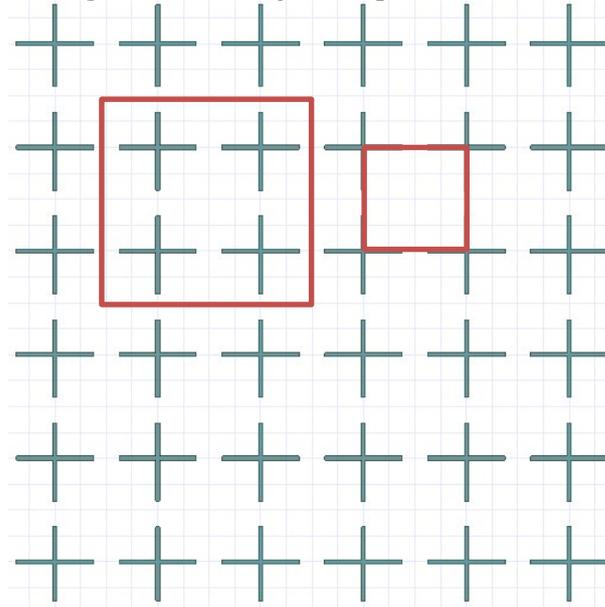
$$L_{ef2} = 3L_1 + 2L_2 + 3L_3 \quad (6)$$

3.2. Associação das geometrias

Para os arranjos de dipolos cruzados, foram projetadas quatro FSS de dimensões totais de aproximadamente $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, tendo sido considerado um substrato dielétrico de FR-4, de espessura 1,6 mm, com constante dielétrica de 4,4 e tangente de perdas de 0,02. As FSS têm células unitárias quadradas. As dimensões da célula unitária, W_x e W_y , foram $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, e $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, dispostas em um arranjo matricial; de 4×4 , 4×4 , 5×5 e 7×7 , respectivamente, de acordo com as dimensões dos dipolos cruzados, Figura 29.

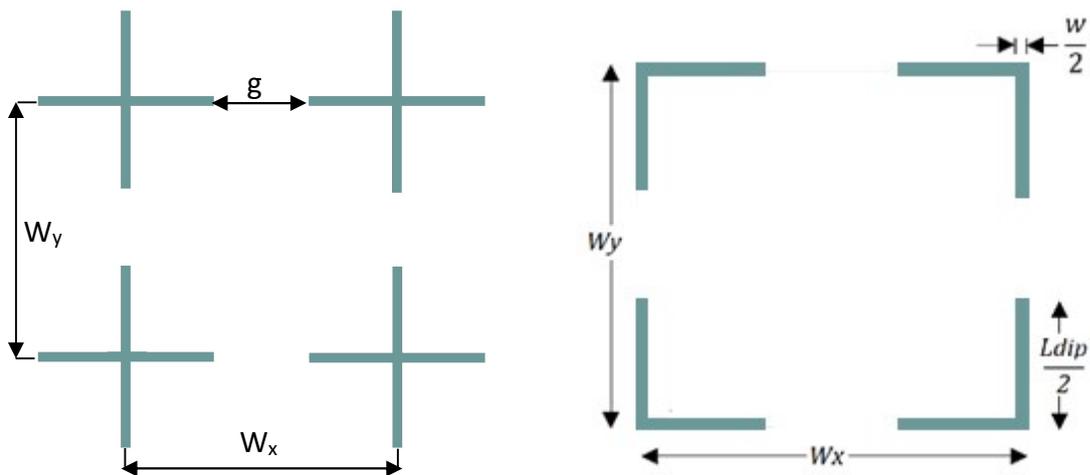
Na Figuras 30 é ilustrado o processo de obtenção da célula unitária. Entre os dipolos cruzados existe um espaçamento g de 1mm.

Figura 29 –Arranjo de dipolos cruzados



Fonte: Autor

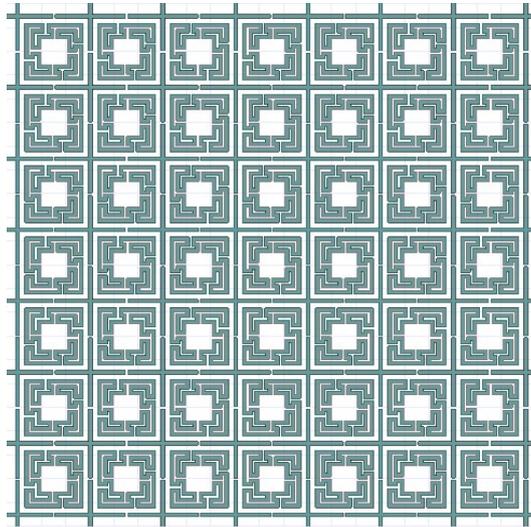
Figura 30 – Célula unitária considerada para FSS



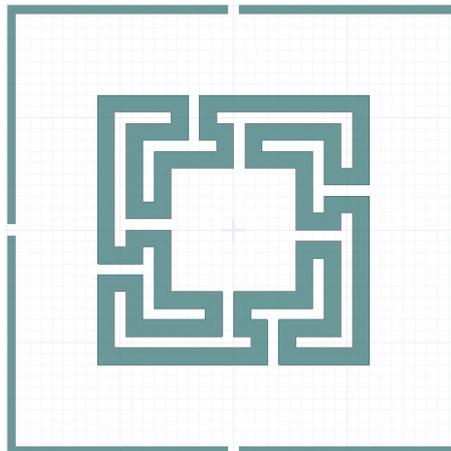
Fonte: Autor

Na geometria da FSS apresentada na Figura 30 é adicionada a geometria matrioska quadrada apresentada anteriormente, assim associando as duas geometrias em uma única FSS, como está mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Célula unitária com dipolo cruzado e matrioska



(a) FSS com geometrias associadas



(b) Célula unitária com geometrias associadas

Fonte: Autor

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

Neste Capítulo, inicialmente, são analisadas numericamente a resposta em frequência das FSS com cada geometria, dipolos cruzados e matrioska, isoladamente. Em seguida, são analisadas as respostas em frequência das FSS com as duas geometrias associadas. Na sequência são apresentados os resultados experimentais e discutido o efeito do acoplamento entre as geometrias.

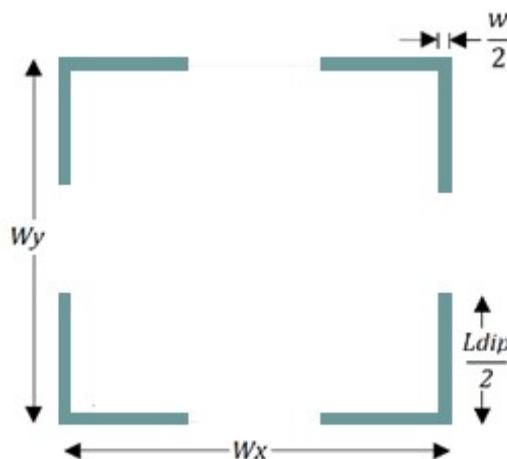
4.1. Análise numérica das FSS com geometrias isoladas e com geometrias associadas

Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o *software* comercial ANSYS Designer. Para todas as FSS analisadas é considerado um substrato de FR-4 com constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$, tangente de perdas 0,02 e espessura $h = 1,6 \text{ mm}$. A largura da fita, W , tanto para os dipolos cruzados como para a matrioska também é constante e igual a 1,5 mm. Da mesma forma, o espaçamento g também é constante e igual a 1,0 mm.

4.1.1. Análise numérica das FSS com geometria dipolos cruzados

Conforme descrito na Figura 30, Capítulo 3, a célula unitária para a geometria dipolos cruzados é repetida e apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Célula unitária da geometria de dipolos cruzados utilizada na simulação



Fonte: Autor

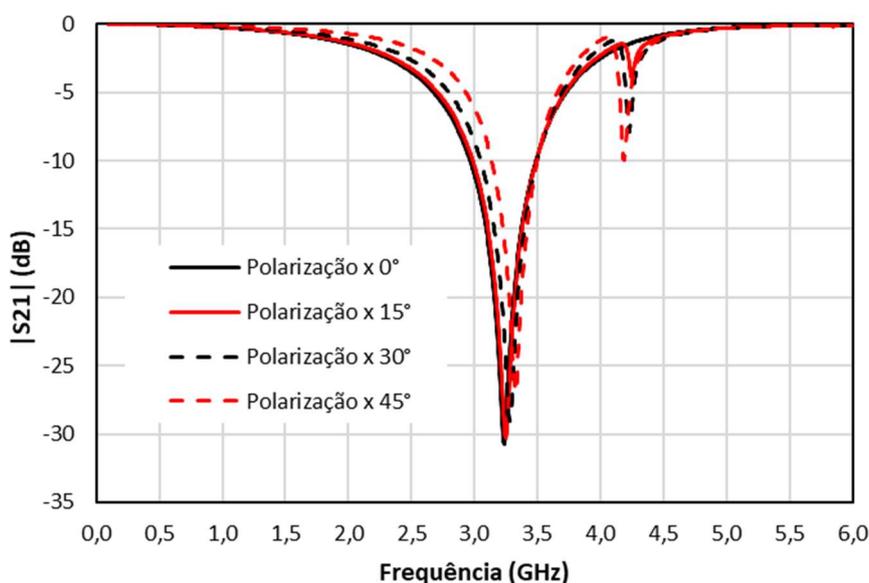
Para exemplificar a análise numérica, foram consideradas quatro FSS com as dimensões apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões da geometria dipolos cruzados utilizada em cada FSS

FSS	$W_x = W_y$	L_{dip}	Arranjo
1	30,0 mm	29,0 mm	7×7
2	40,0 mm	39,0 mm	5×5
3	50,0 mm	49,0 mm	4×4
4	60,0 mm	59,0 mm	4×4

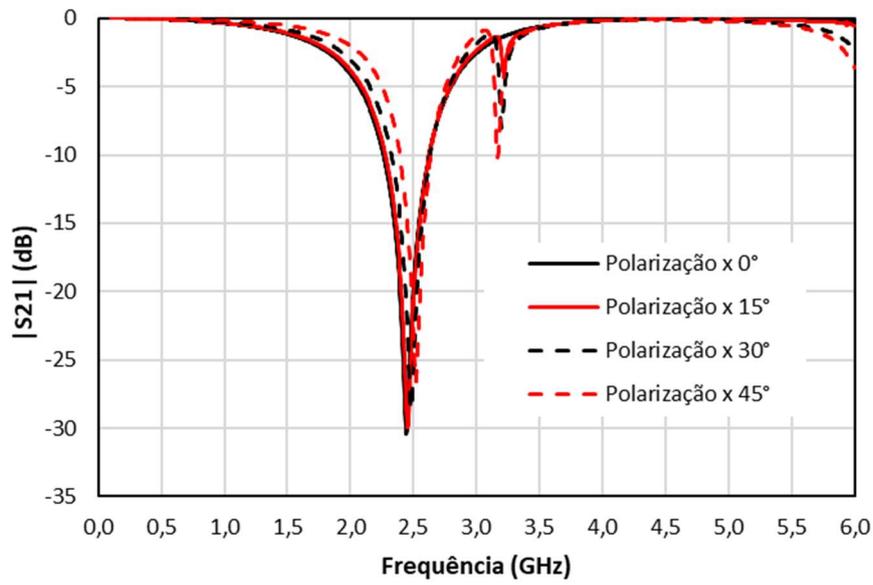
Nas Figuras 33-36 são apresentadas, para as quatro FSS, as respostas em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para polarização x , ângulos de incidência de 0° , 15° , 30° e 45° , observando-se que, como esperado, à medida que o comprimento dos dipolos aumenta a frequência de ressonância diminui. Além disso, verifica-se que ocorre uma pequena variação da frequência de ressonância. As frequências de ressonâncias obtidas numericamente e utilizando (1) e (2), são apresentadas na Tabela 2, observando-se uma boa concordância, com uma diferença máxima de 1,55%.

Figura 33 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , dipolos cruzados, FSS 1



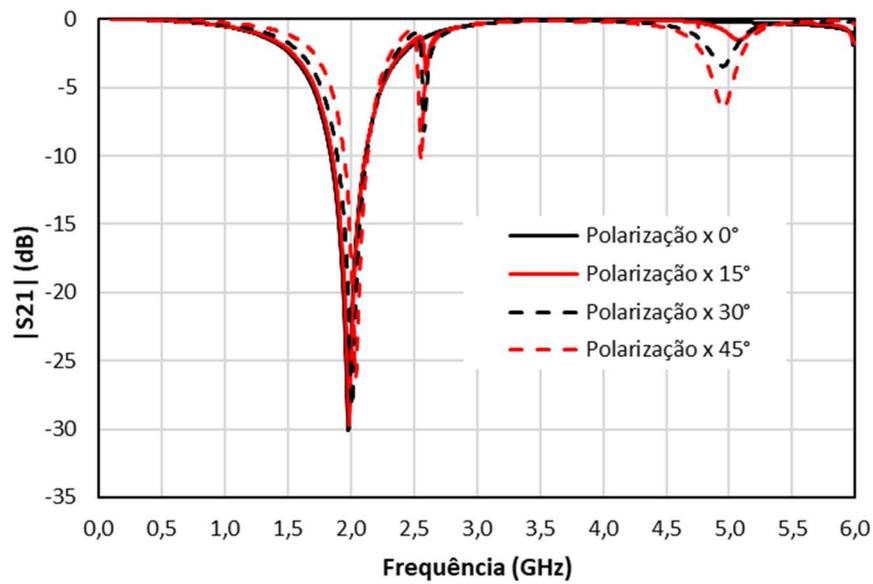
Fonte: Autor

Figura 34 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , dipolos cruzados, FSS 2



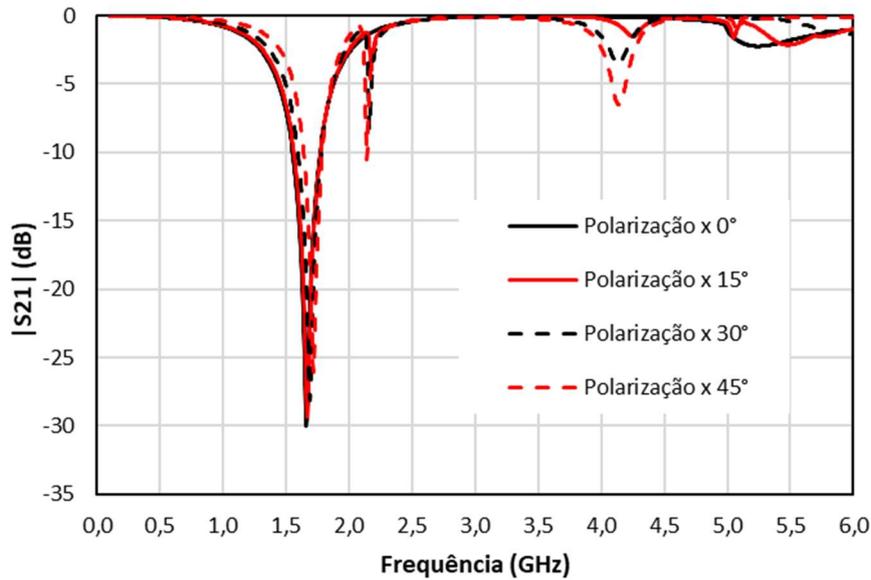
Fonte: Autor

Figura 35 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , dipolos cruzados, FSS 3



Fonte: Autor

Figura 36 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , dipolos cruzados, FSS 4



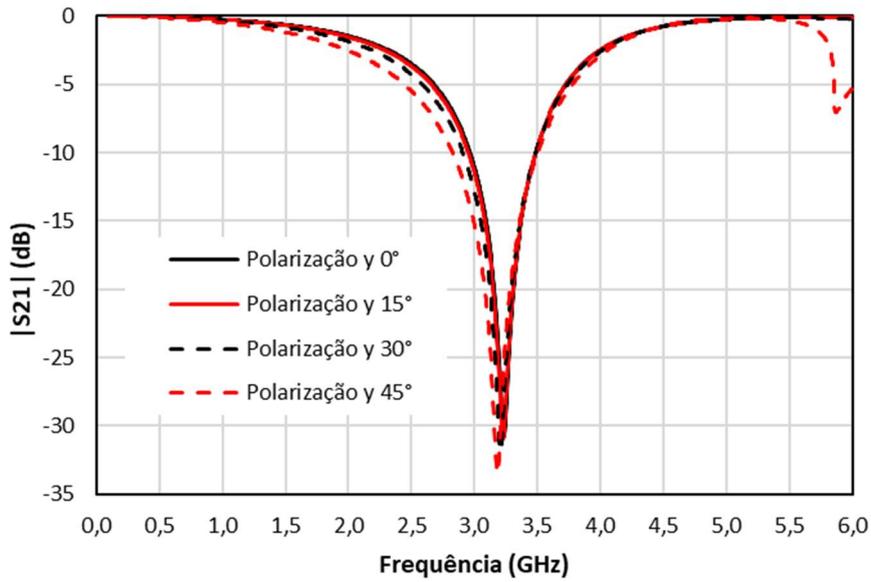
Fonte: Autor

Tabela 2 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização x , geometria dipolos cruzados

FSS	F_{res} (numérico)	F_{res} (calculado)	Diferença
1	3,28 GHz	3,23 GHz	1,55 %
2	2,46 GHz	2,44 GHz	0,79 %
3	1,97 GHz	1,97 GHz	0,16 %
4	1,64 GHz	1,66 GHz	1,02 %

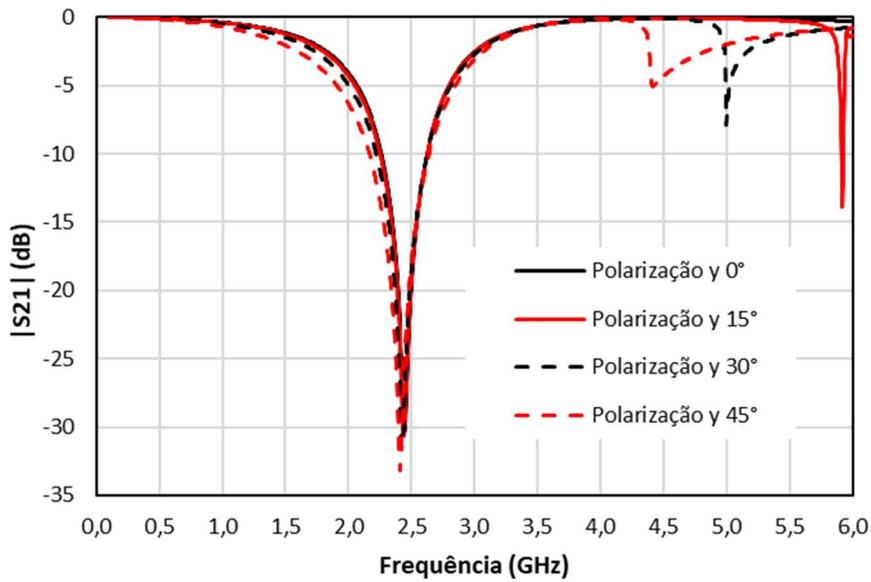
De maneira análoga, nas Figuras 37-40 são apresentadas, para as quatro FSS, as respostas em frequência, para polarização y , ângulos de incidência de 0° , 15° , 30° e 45° . Note que, neste caso, a variação da frequência de ressonância é ainda menor do que a observada para a polarização x . As frequências de ressonâncias obtidas numericamente e utilizando (1) e (2), são apresentadas na Tabela 3, observando-se uma boa concordância, com uma diferença máxima de 1,55%.

Figura 37 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , dipolos cruzados, FSS 1



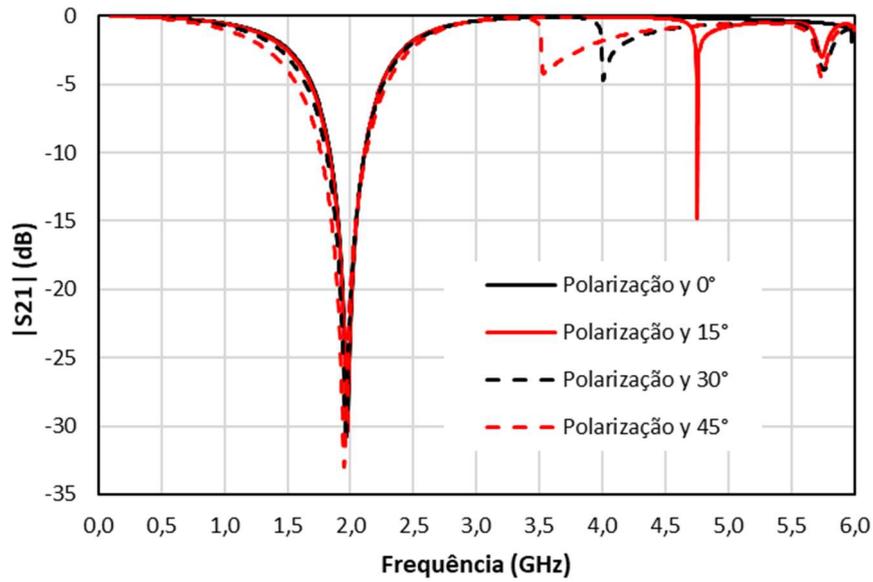
Fonte: Autor

Figura 38 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , dipolos cruzados, FSS 2



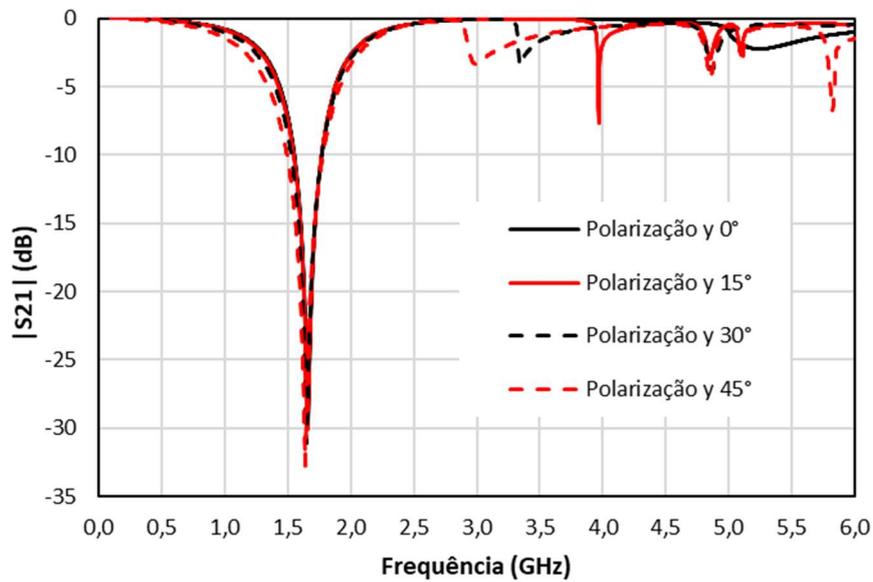
Fonte: Autor

Figura 39 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , dipolos cruzados, FSS 3



Fonte: Autor

Figura 40 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , dipolos cruzados, FSS 4



Fonte: Autor

Tabela 3 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização y , geometria dipolos cruzados

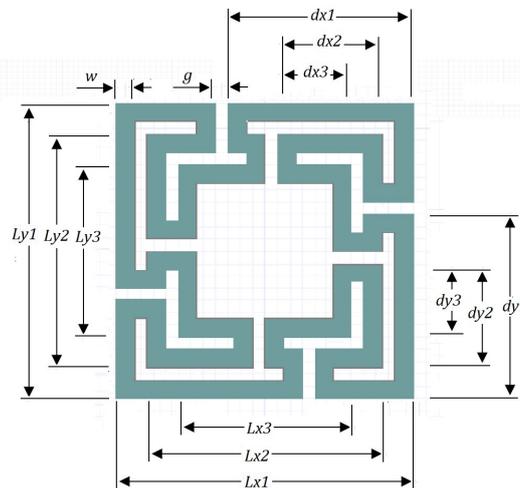
FSS	F_{res} (numérico)	F_{res} (calculado)	Diferença
1	3,28 GHz	3,23 GHz	1,55 %
2	2,46 GHz	2,44 GHz	0,79 %
3	1,97 GHz	1,97 GHz	0,16 %
4	1,64 GHz	1,66 GHz	1,02 %

Portanto, a geometria dipolo cruzados nestas dimensões caracterizadas apresenta-se como praticamente independente da polarização e do ângulo de incidência, para $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$

4.1.2. Análise numérica da FSS com geometria matrioska

Conforme descrito na Figura 28, Capítulo 3, a célula unitária para a geometria matrioska é repetida aqui, apresentada na Figura 41.

Figura 41 – Célula unitária da geometria matrioska utilizada na simulação



Fonte: Autor

Nesta dissertação a geometria matrioska tem dimensões fixas, sendo essas apresentadas na Tabela 4.

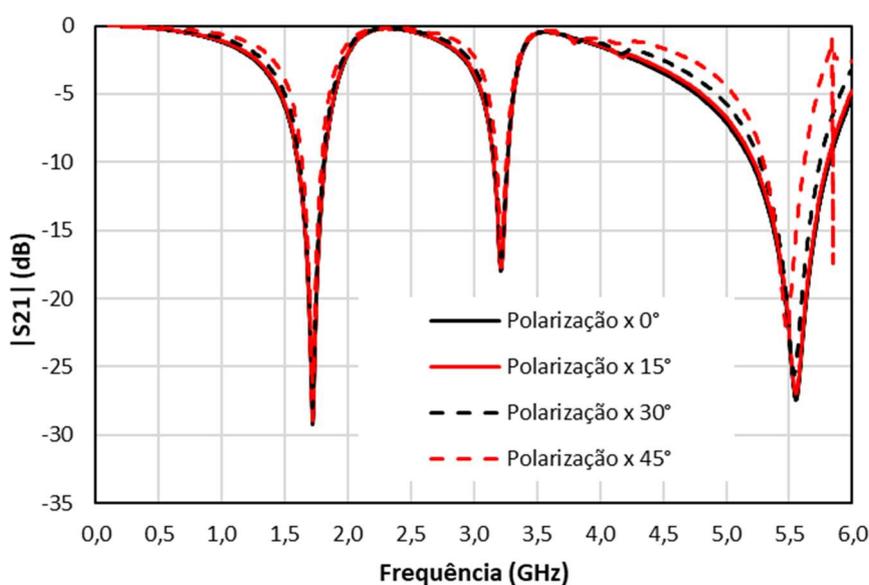
Tabela 4 – Dimensões da geometria matrioska

Dimensão	Valor (mm)	Dimensão	Valor (mm)
W	1,5	g	1,0
L_1	24,0	d_1	15,0
L_2	19,0	d_2	8,5
L_3	14,0	d_3	6,0

Nas Figuras 42-45 são apresentadas as respostas em frequência, para polarização x , ângulos de incidência de 0° , 15° , 30° e 45° , considerando diferentes tamanhos da célula unitária. A análise da variação das dimensões da célula unitária é importante, pois quando as dimensões dos dipolos cruzados é modificada, modificam-se as dimensões da célula unitária. Destaque-se que, na faixa de frequência considerada, a FSS baseada na geometria matrioska apresenta duas frequências de ressonância, enquanto que o dipolo apenas uma. As frequências de ressonâncias obtidas numericamente e utilizando (3)–(6), são apresentadas na Tabela 5, observando-se uma boa concordância, com uma diferença máxima de 11,93%.

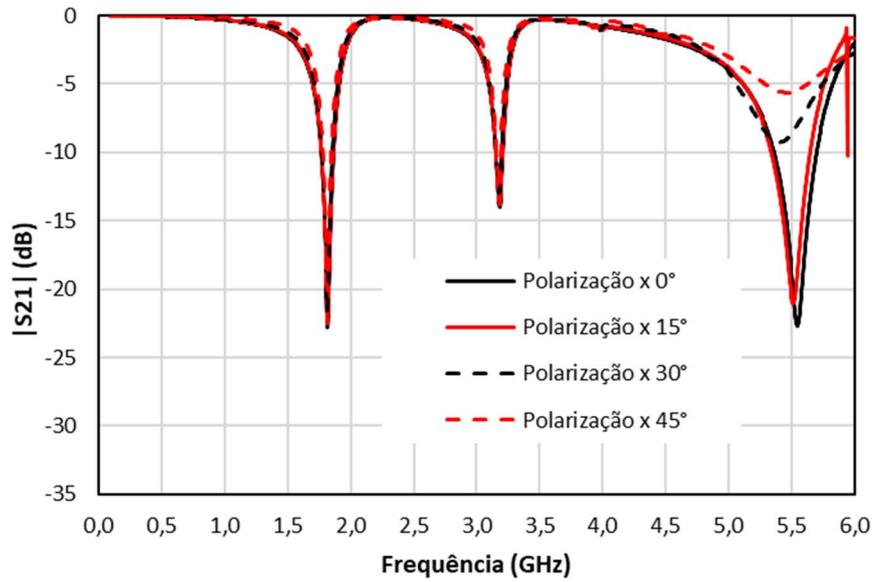
Para uma dada dimensão da célula unitária, observa-se que praticamente não ocorre variação da frequência de ressonância com a variação do ângulo de incidência.

Figura 42 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , matrioska, FSS 5



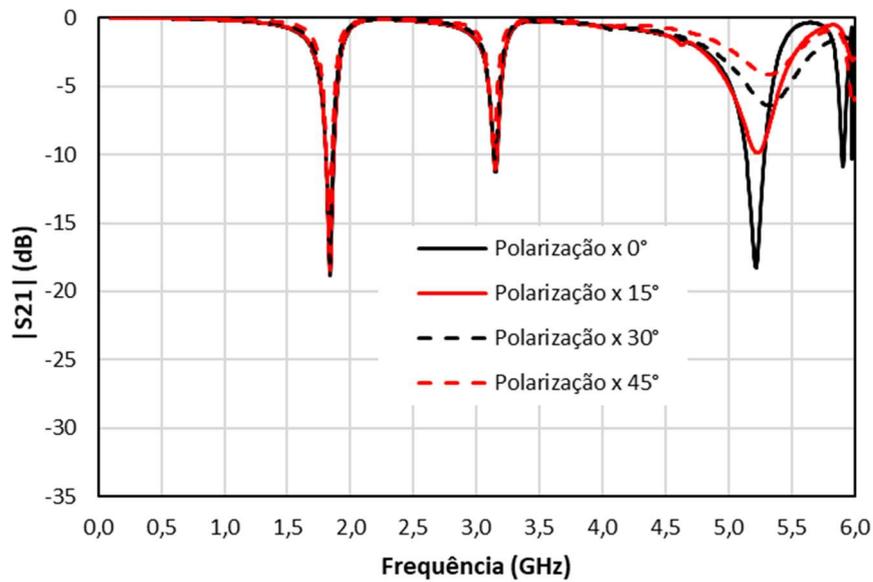
Fonte: Autor

Figura 43 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , matrioska, FSS 6



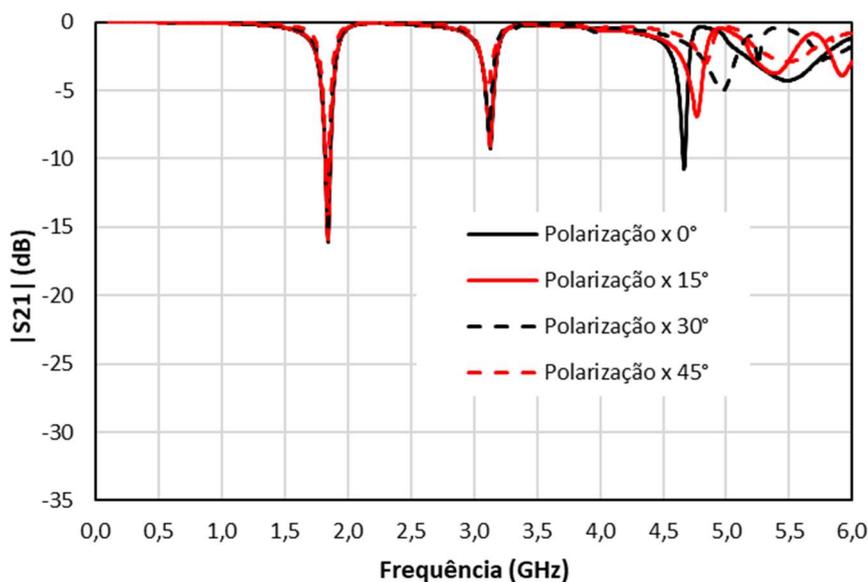
Fonte: Autor

Figura 44 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , matrioska, FSS 7



Fonte: Autor

Figura 45 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , matrioska, FSS 8



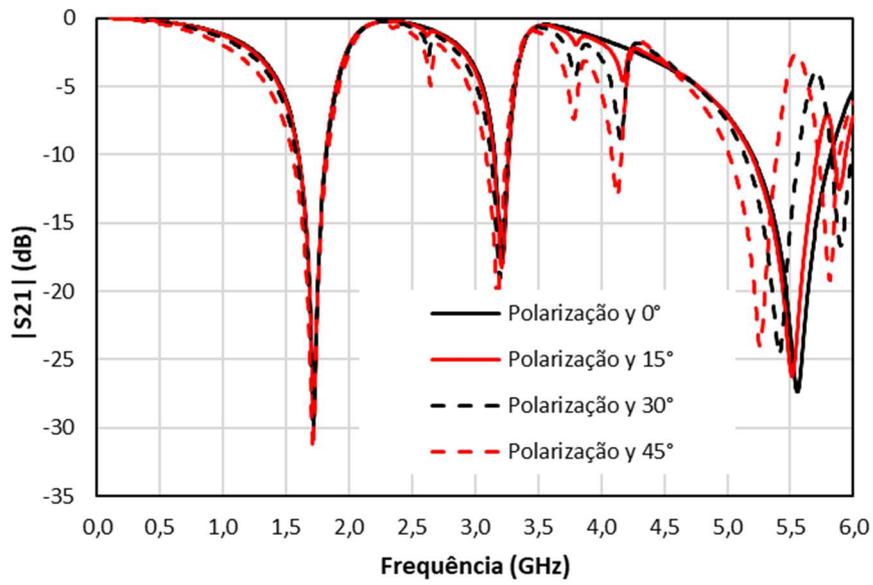
Fonte: Autor

Tabela 5 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização x , geometria matrioska

FSS	F_{res1} (num)	F_{res1} (cal)	Diferença	F_{res2} (num)	F_{res2} (cal)	Diferença
5	1,72 GHz	1,95 GHz	11,93 %	3,21 GHz	3,28 GHz	2,26 %
6	1,82 GHz	1,95 GHz	6,81 %	3,18 GHz	3,28 GHz	3,32 %
7	1,84 GHz	1,95 GHz	5,79 %	3,15 GHz	3,28 GHz	4,08 %
8	1,84 GHz	1,95 GHz	5,79 %	3,13 GHz	3,28 GHz	4,84 %

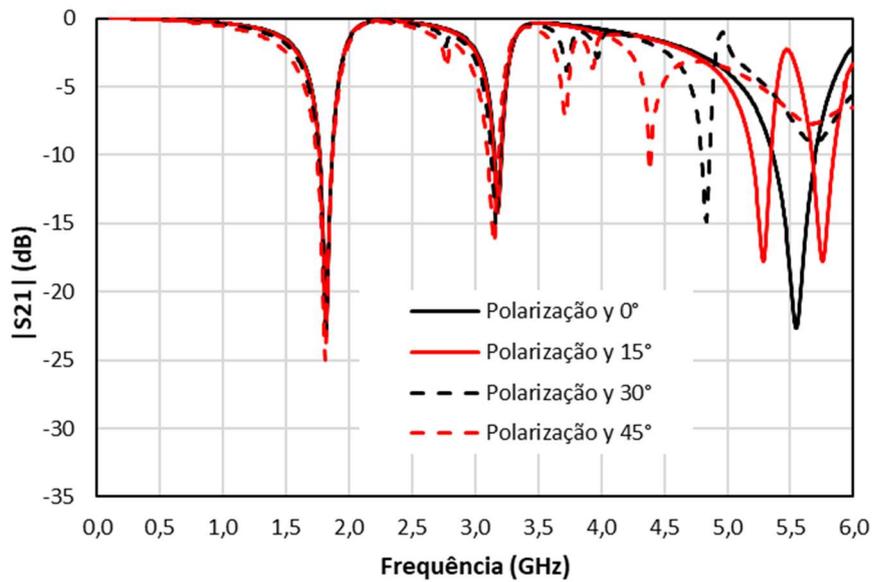
Analogamente à polarização x , nas Figuras 46-49 são apresentadas as respostas em frequência, para polarização y , ângulos de incidência de 0° , 15° , 30° e 45° , considerando diferentes tamanhos da célula unitária. Praticamente, verifica-se a mesma resposta obtida para a polarização x . As frequências de ressonâncias obtidas numericamente e utilizando (3)–(6), são apresentadas na Tabela 6, observando-se uma boa concordância, com uma diferença máxima de 11,93%.

Figura 46 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y, matrioska, FSS 5



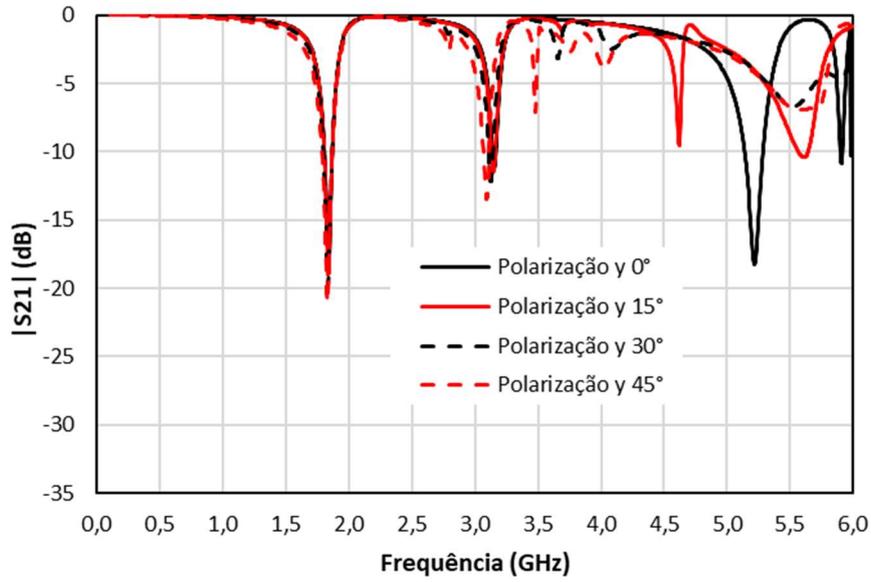
Fonte: Autor

Figura 47 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y, matrioska, FSS 6



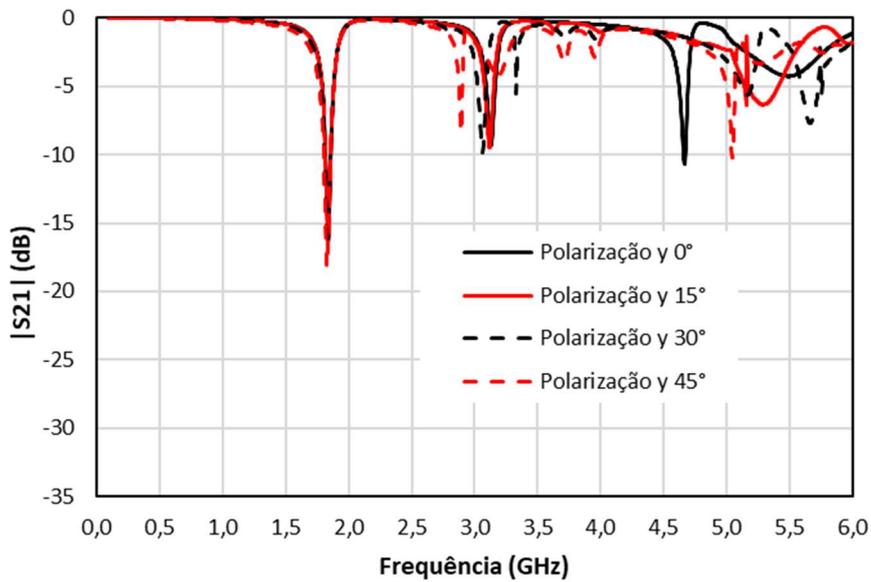
Fonte: Autor

Figura 48 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y, matrioska, FSS 7



Fonte: Autor

Figura 49 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y, matrioska, FSS 8



Fonte: Autor

Tabela 6 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização y, geometria matrioska

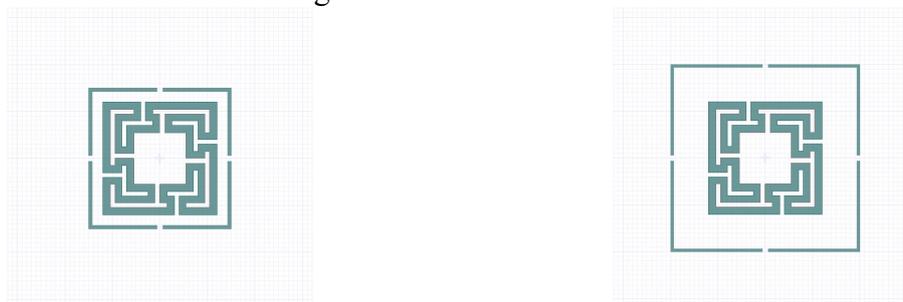
FSS	F _{res1} (num)	F _{res1} (cal)	Diferença	F _{res2} (num)	F _{res2} (cal)	Diferença
5	1,72 GHz	1,95 GHz	11,93 %	3,21 GHz	3,28 GHz	2,26 %
6	1,82 GHz	1,95 GHz	6,81 %	3,18 GHz	3,28 GHz	3,32 %
7	1,84 GHz	1,95 GHz	5,79 %	3,15 GHz	3,28 GHz	4,08 %
8	1,84 GHz	1,95 GHz	5,79 %	3,13 GHz	3,28 GHz	4,84 %

Portanto, a geometria matrioska apresenta-se como praticamente independente da polarização e do ângulo de incidência, para $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$.

4.1.3. Análise numérica das FSS com geometrias associadas

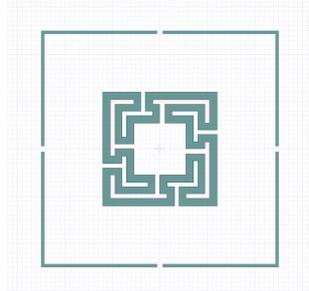
Considerando as geometrias e dimensões simuladas nas seções 4.1.1 e 4.1.2, as duas geometrias, dipolos cruzados e matrioska, foram associadas, conforme ilustrado na Figura 50.

Figura 50 – Células das FSS

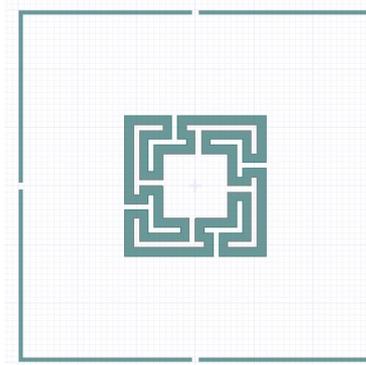


a) Célula de 30 mm × 30 mm da FSS 9

b) Célula de 40 mm × 40 mm da FSS 10



c) Célula de 50 mm × 50 mm da FSS 11

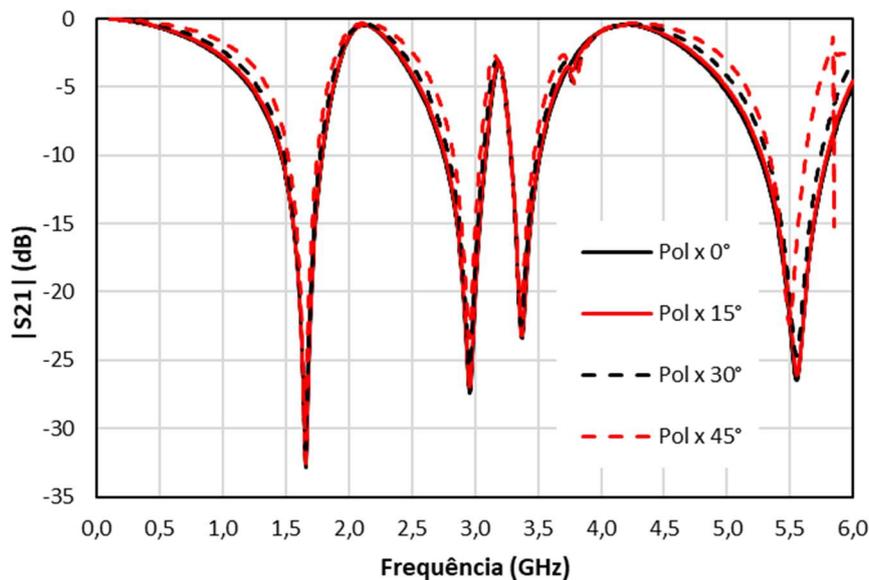


d) Célula de 60 mm × 60 mm da FSS 12

Fonte: Autor

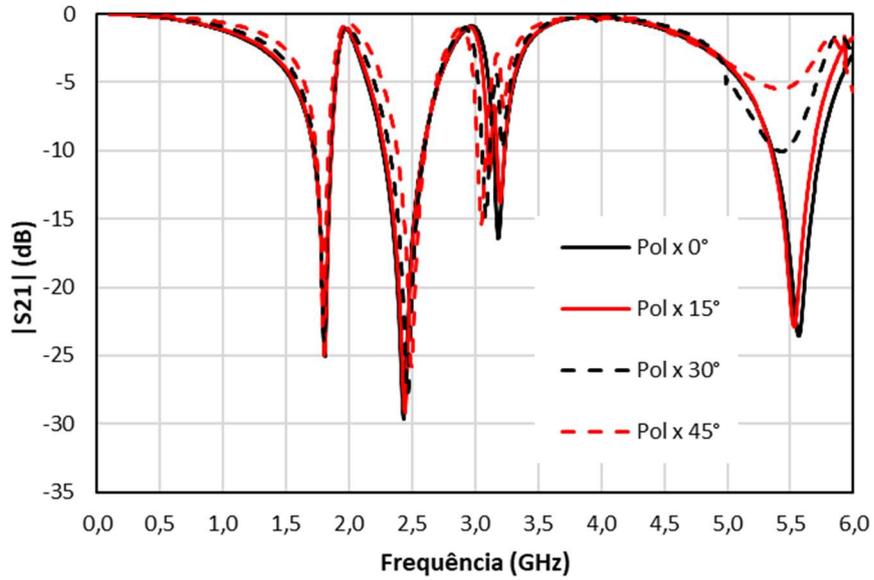
Nas Figuras 51-55 são apresentadas as respostas em frequência, para polarização x , ângulos de incidência de 0° , 15° , 30° e 45° , considerando diferentes dimensões dos dipolos cruzados. Inicialmente, destaque-se a presença das três ressonâncias, sendo duas decorrentes da geometria matrioska e uma dos dipolos cruzados. Além disso, verifica-se que mesmo com a variação das dimensões dos dipolos cruzados, e a conseqüente variação da frequência de ressonância correspondente, as frequências de ressonância correspondentes à geometria matrioska permanecem praticamente constante. Destaque-se ainda que, para uma dada dimensão dos dipolos cruzados, a resposta em frequência permanece praticamente constante com a variação do ângulo de incidência. Estes resultados estão resumidos na Tabela 7.

Figura 51 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , geometrias associadas, FSS 9



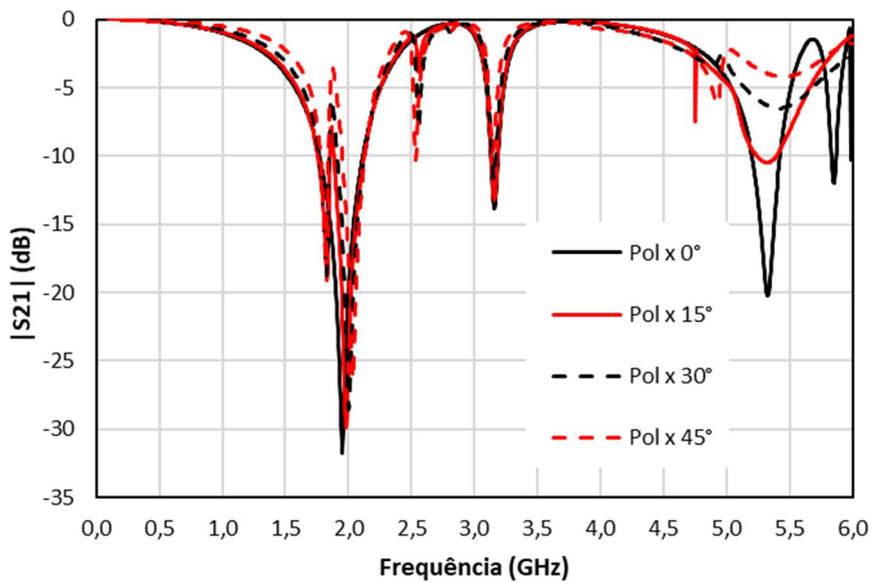
Fonte: Autor

Figura 52 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , geometrias associadas, FSS 10



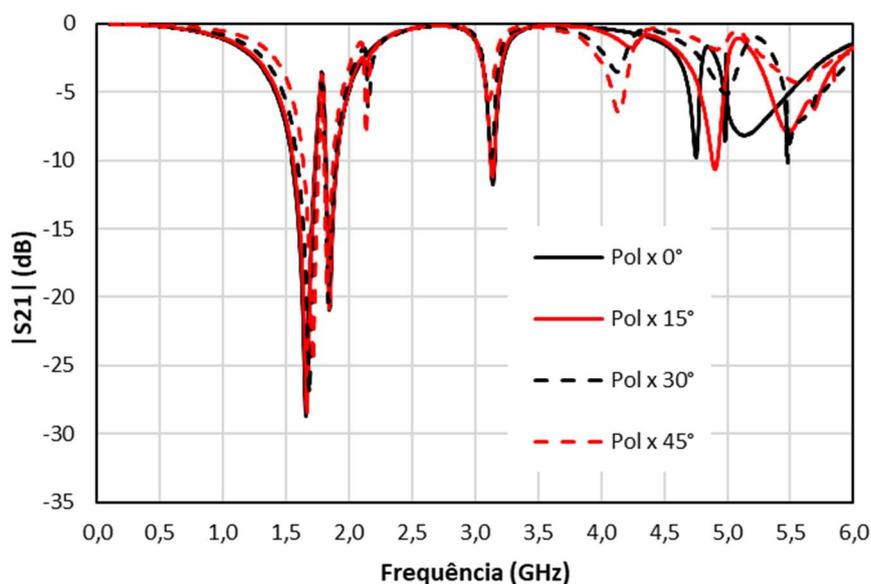
Fonte: Autor

Figura 53 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , geometrias associadas, FSS 11



Fonte: Autor

Figura 54 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização x , geometrias associadas, FSS 12



Fonte: Autor

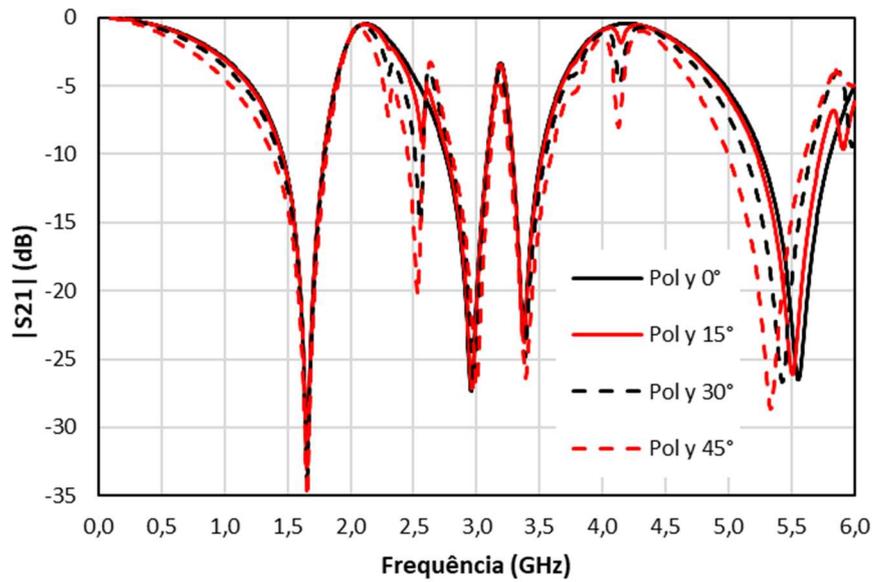
Tabela 7 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização x , geometria associadas

FSS	9	10	11	12
F_{res1} (num)	1,65 GHz	1,81 GHz	1,83 GHz	1,84 GHz
F_{res1} (cal)	1,95 GHz	1,95 GHz	1,95 GHz	1,95 GHz
Diferença	15,26 %	7,32 %	6,30 %	5,53 %
F_{res2} (num)	2,96 GHz	2,43 GHz	1,97 GHz	1,65 GHz
F_{res2} (cal)	3,28 GHz	2,46 GHz	1,97 GHz	1,64 GHz
Diferença	9,92 %	1,40 %	0,08 %	-0,72 %
F_{res3} (num)	3,37 GHz	3,18 GHz	3,15 GHz	3,14 GHz
F_{res3} (cal)	3,28 GHz	3,28 GHz	3,28 GHz	3,28 GHz
Diferença	-2,60 %	3,17 %	4,08 %	4,54 %

Analogamente à polarização x , nas Figuras 55-58 são apresentadas, as respostas em frequência, para polarização y , ângulos de incidência de 0° , 15° , 30° e 45° , considerando diferentes dimensões dos dipolos cruzados. Praticamente, verifica-se o mesmo comportamento observado para a polarização x , em que mesmo com a variação das dimensões dos dipolos cruzados, e a conseqüente variação da frequência de ressonância correspondente, as

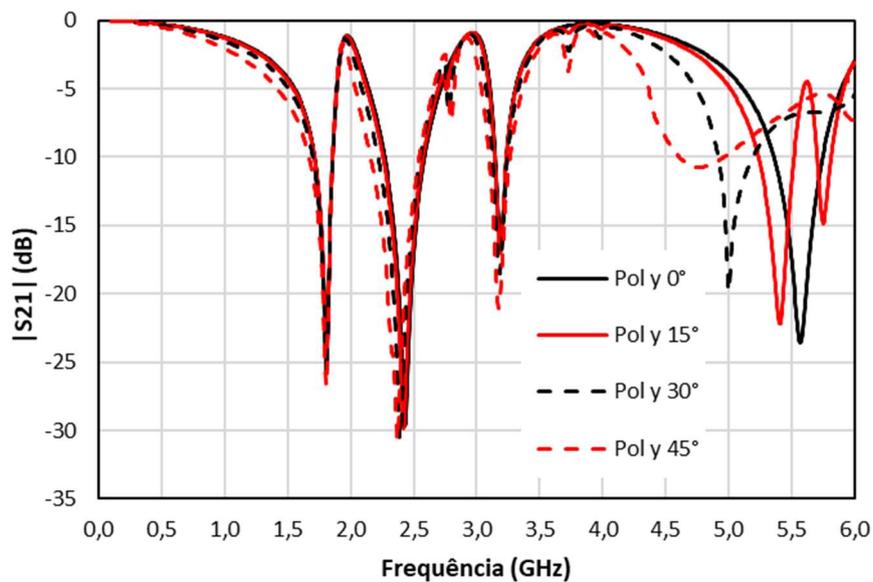
frequências de ressonância correspondentes à geometria matrioska permanecem constante. Estes resultados estão resumidos na Tabela 8.

Figura 55 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , geometrias associadas, FSS 9



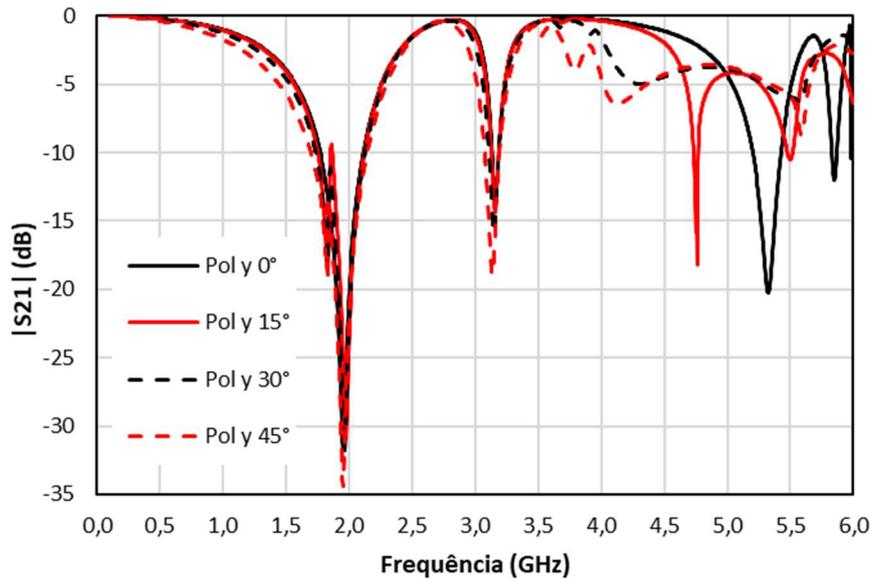
Fonte: Autor

Figura 56 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y , geometrias associadas, FSS 10



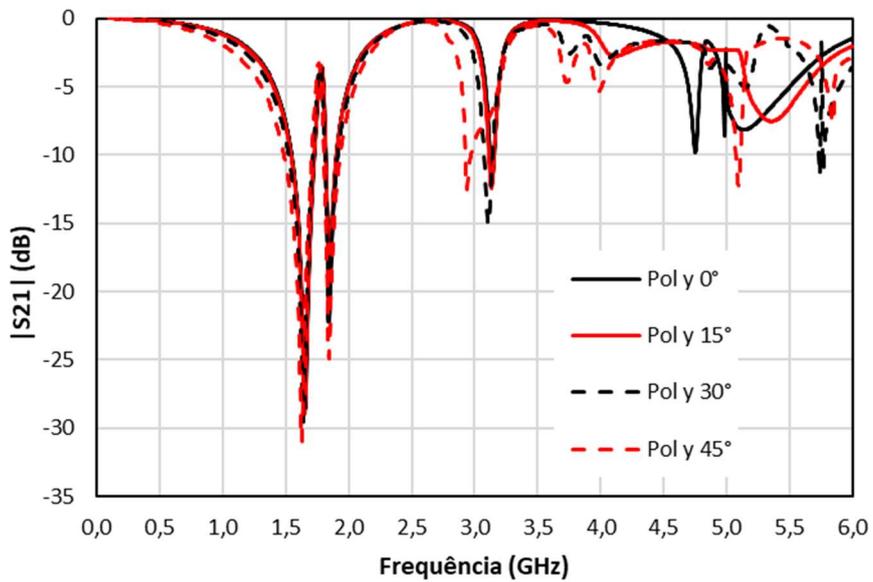
Fonte: Autor

Figura 57 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y, geometrias associadas, FSS 11



Fonte: Autor

Figura 58 – Resultado numérico - Resposta em frequência para polarização y, geometrias associadas, FSS 12



Fonte: Autor

Tabela 8 – Comparação dos resultados numéricos com calculados, polarização y, geometria associadas

FSS	9	10	11	12
F _{res1} (num)	1,65 GHz	1,81 GHz	1,83 GHz	1,84 GHz
F _{res1} (cal)	1,95 GHz	1,95 GHz	1,95 GHz	1,95 GHz
Diferença	15,26 %	7,32 %	6,30 %	5,53 %
F _{res2} (num)	2,96 GHz	2,43 GHz	1,97 GHz	1,65 GHz
F _{res2} (cal)	3,28 GHz	2,46 GHz	1,97 GHz	1,64 GHz
Diferença	9,92 %	1,40 %	0,08 %	-0,72 %
F _{res3} (num)	3,37 GHz	3,18 GHz	3,15 GHz	3,14 GHz
F _{res3} (cal)	3,28 GHz	3,28 GHz	3,28 GHz	3,28 GHz
Diferença	-2,60 %	3,17 %	4,08 %	4,54 %

Portanto, a FSS com geometrias dipolos cruzados e matrioska associadas apresenta-se como praticamente independente da polarização e do ângulo de incidência, para $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$. Verificou-se ainda que é possível ajustar as frequências de ressonância relativas à uma geometria dipolos cruzados, sem praticamente alterar as ressonâncias relativas à outra geometria matrioska.

4.2. Caracterização experimental das FSS com associadas

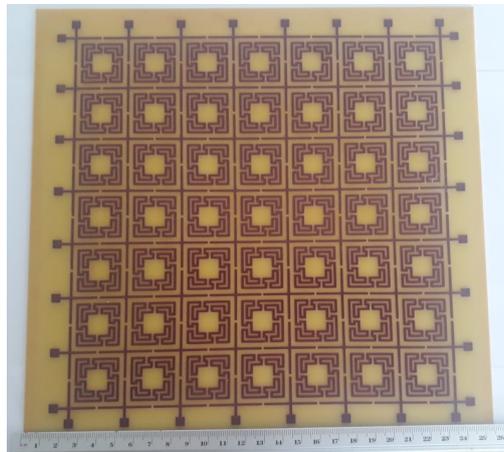
Com o objetivo de validar os resultados obtidos numericamente, foram fabricadas e caracterizadas experimentalmente quatro FSS utilizando as geometrias dipolos cruzados e matrioska associadas. As FSS têm as mesmas especificações da seção 4.1.3, ou seja, a geometria matrioska tem dimensões fixas e os dipolos cruzados apresentam diferentes comprimentos ($L_{dip} = 29 \text{ mm}, 39 \text{ mm}, 49 \text{ mm}, 59 \text{ mm}$). É considerado o mesmo dielétrico (FR-4, $\epsilon_r = 4,4$, tangente de perdas 0,02 e espessura $h = 1,6 \text{ mm}$). Os resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Medidas em Micro-ondas do GTEMA-IFPB, utilizando a configuração de medição apresentada na Seção 2.3.3, Figura 26. Na Figura 59 são apresentadas fotografias da configuração utilizada na caracterização experimental. Na Figura 60 são apresentadas fotografias das FSS fabricadas.

Figura 59 – Fotografias da configuração utilizada na caracterização experimental

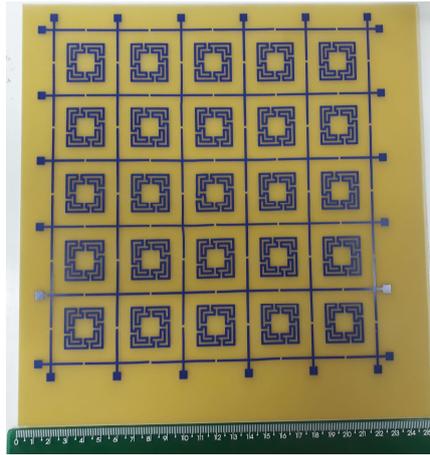


Fonte: Autor

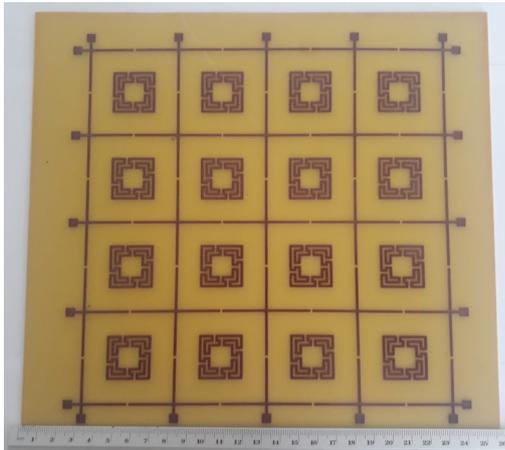
Figura 60 –Fotografia das FSS fabricadas



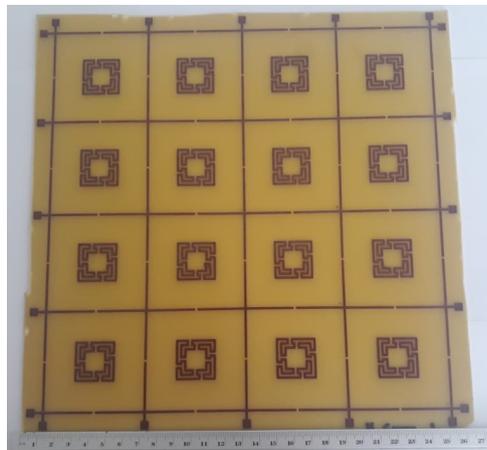
(a) FSS 9 com célula de 30 mm × 30 mm



(b) FSS 10 com célula de 40 mm × 40 mm



(c) FSS 11 com célula de 50 mm × 50 mm



(d) FSS 12 com célula de 60 mm × 60 mm

Fonte: Autor

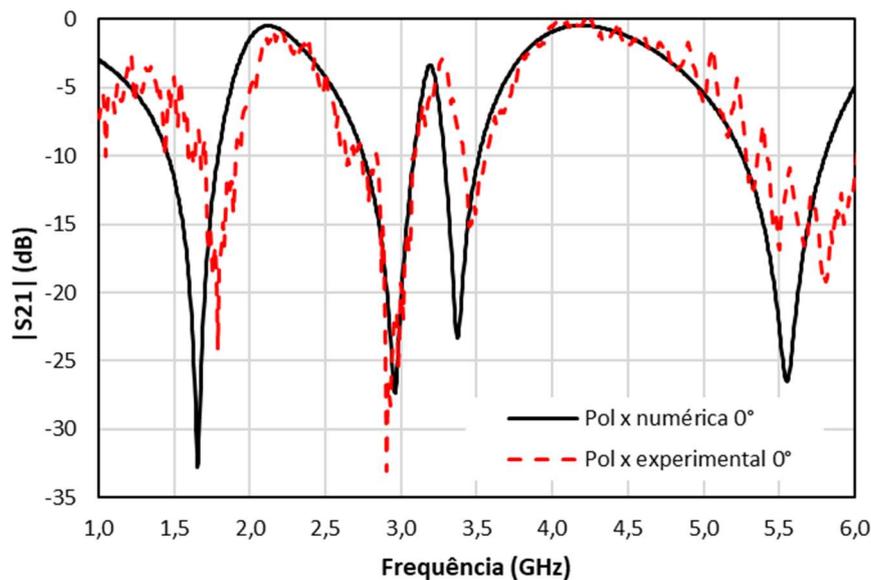
Nas Figuras 61-88 são comparados os resultados experimentais com os resultados numéricos para as FSS fabricadas, polarização x , ângulos de incidência de 0° , 15° , 30° e 45° e polarização y , com os mesmos ângulos de incidência.

Para a FSS 9 (30 mm × 30 mm), Figuras 61-64, para os ângulos de incidência de 0° e 15° observa-se uma boa concordância entre os resultados, destacando-se a presença das três ressonâncias, como previsto numericamente.

Na faixa inicial de frequência, de 1,0 GHz até 1,5 GHz, observa-se uma maior divergência dos resultados, mas essa decorre do processo de medição.

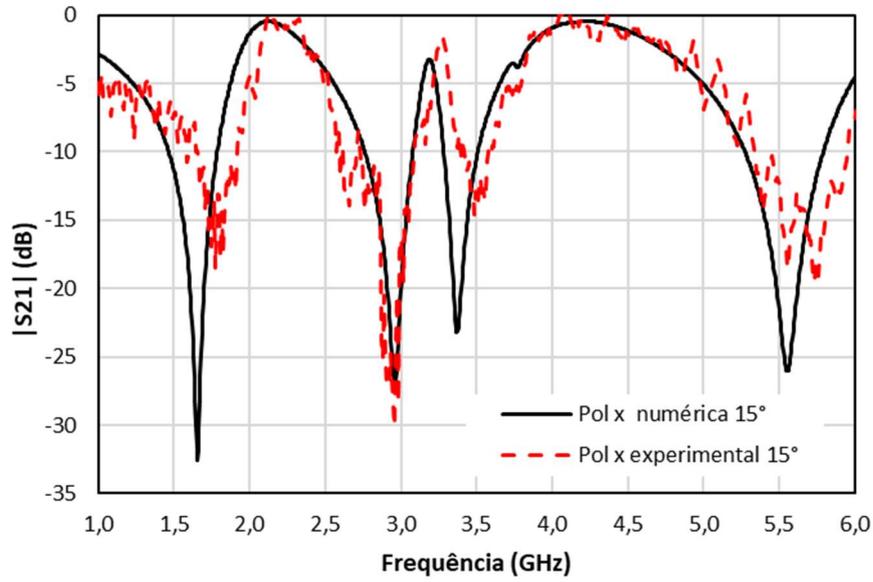
Para os ângulos de incidência de 30° e 45° observa-se uma maior divergência entre os resultados. Basicamente, essa divergência decorre de dois fatores: o processo de medição (para ângulos maiores, os absorvedores bloqueiam parte do sinal) e a presença dos modos de grade (*grating lobes*). Note que os modos de grade já começam a aparecer mesmo para o ângulo de incidência de 15°, em torno de 2,75 GHz. A presença desses modos nos resultados experimentais, e não nas simulações, decorre do fato de na medição a onda incidente na FSS não ser totalmente plana. Entretanto, esse comportamento ficará mais claro para as demais FSS.

Figura 61 – Comparação de respostas em frequência da polarização x, $\theta = 0^\circ$, FSS 9 (30 mm × 30 mm)



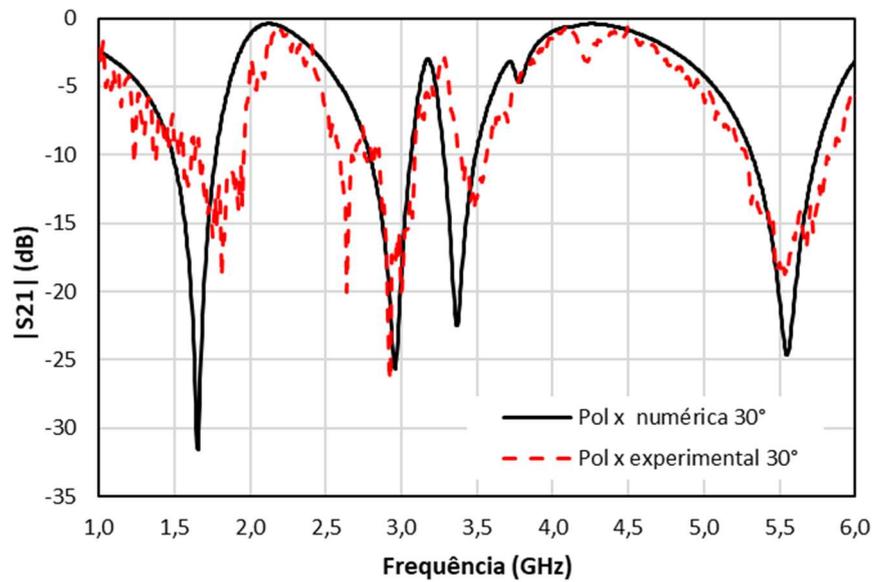
Fonte: Autor

Figura 62 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 15^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm)



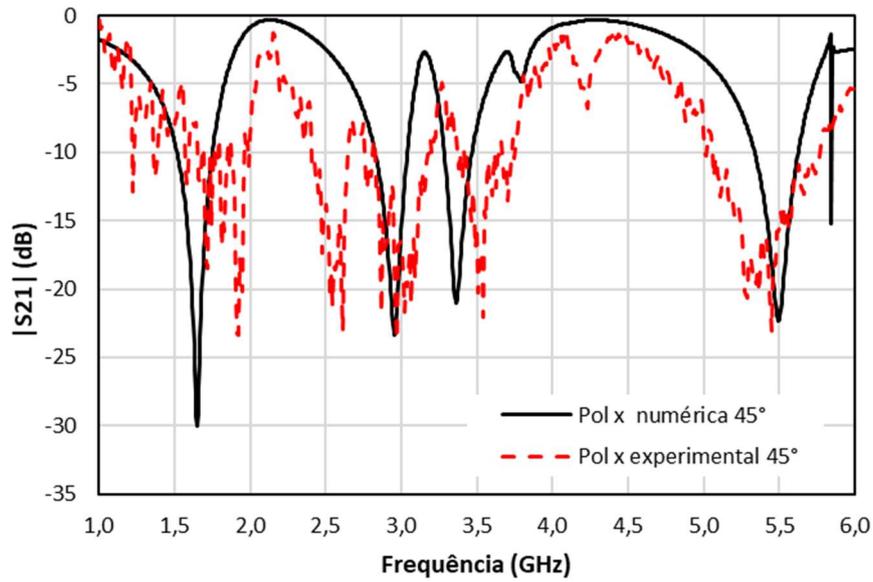
Fonte: Autor

Figura 63 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 30^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm)



Fonte: Autor

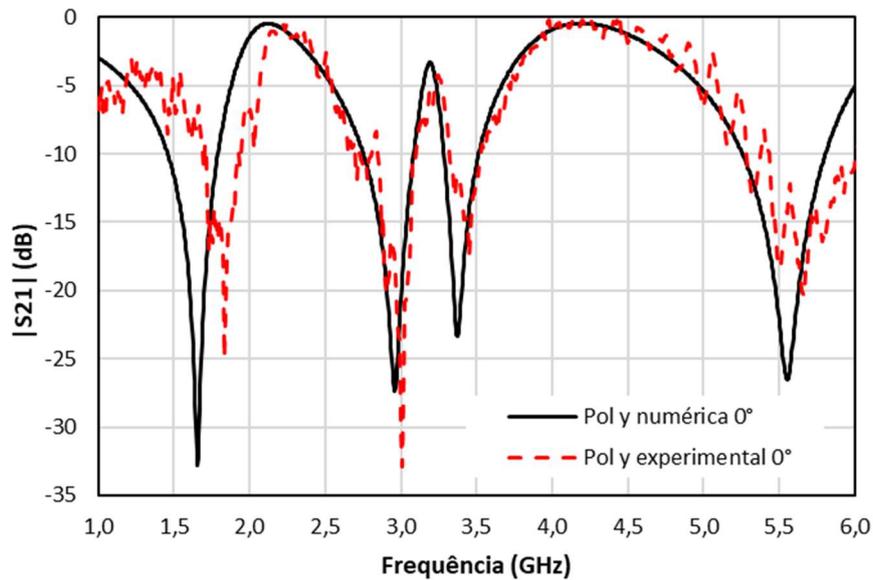
Figura 64 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 45^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm)



Fonte: Autor

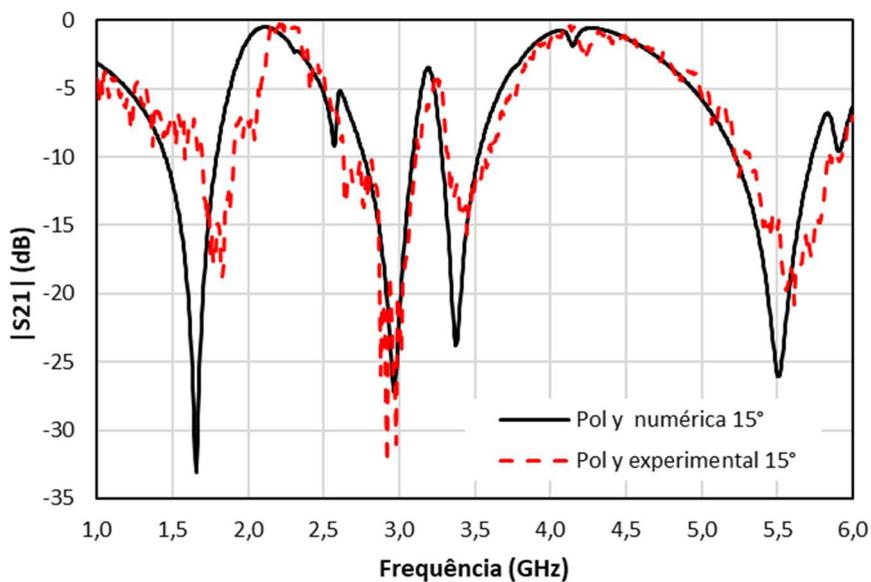
Analogamente, nas Figuras 65-68, são apresentados os resultados para a polarização y . Como esperado, o comportamento dos resultados é semelhante ao dos resultados da polarização x .

Figura 65 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 0^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm)



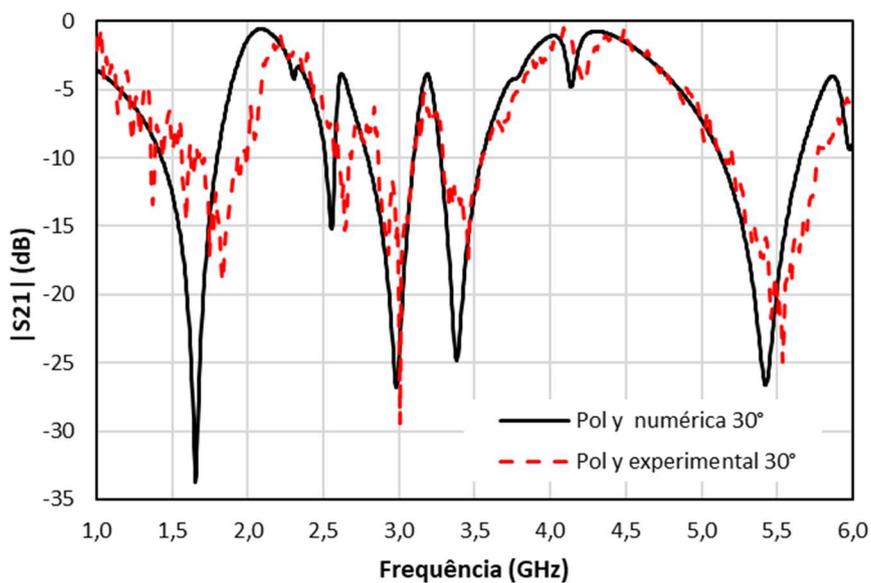
Fonte: Autor

Figura 66 – Comparação de respostas em frequência da polarização y, $\theta = 15^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm)



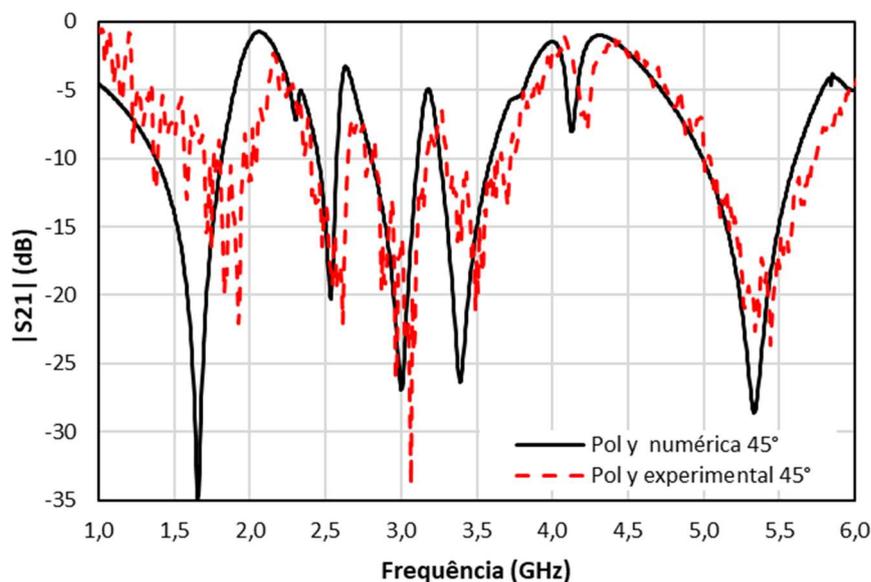
Fonte: Autor

Figura 67 – Comparação de respostas em frequência da polarização y, $\theta = 30^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm)



Fonte: Autor

Figura 68 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 45^\circ$, FSS 9 (30 mm \times 30 mm)



Fonte: Autor

Os resultados para a FSS 9 estão resumidos na Tabela 9, confirmando-se a independência da polarização e do ângulo de incidência, desde que seja desconsiderada a presença do modo de grade.

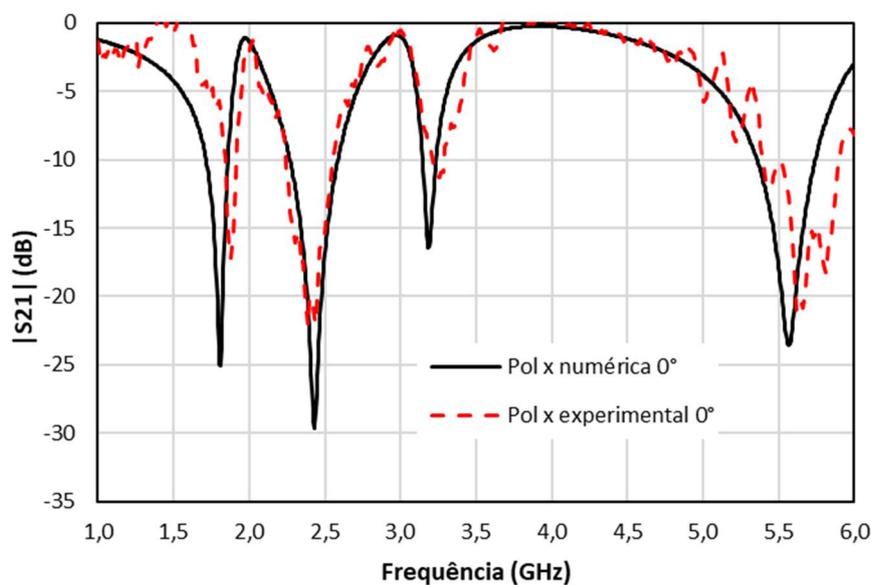
Cabe esclarecer porque nos resultados numéricos o modo de grade aparece para a polarização y e não parecem para a polarização x . Para a polarização x , a variação angular equivalente à variação de θ seria uma variação em ϕ . Portanto, são variações angulares diferentes.

Tabela 9 – Comparação dos resultados numéricos com os experimentais, geometrias associadas, FSS 9 (30 mm × 30 mm)

Ângulo	0°	0°	15°	15°	30°	30°	45°	45°
	Pol. x	Pol. y						
F _{res1} num. (GHz)	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,65
F _{res1} exp. (GHz)	1,79	1,84	1,77	1,83	1,81	1,83	1,93	1,83
Diferença (%)	7,65	9,91	6,71	9,46	8,56	9,46	14,12	9,74
F _{res2} num. (GHz)	2,96	2,96	2,97	2,97	2,99	2,96	3,00	2,96
F _{res2} exp. (GHz)	2,91	3,01	2,95	2,98	2,93	3,01	2,97	3,06
Diferença (%)	1,79	1,56	-0,41	0,50	2,02	1,73	0,98	3,46
F _{res3} num. (GHz)	3,38	3,38	3,38	3,38	3,39	3,36	3,39	3,37
F _{res3} exp. (GHz)	3,45	3,45	3,48	3,45	3,48	3,46	3,54	3,49
Diferença (%)	2,12	2,12	3,13	2,12	2,84	2,81	4,18	3,66

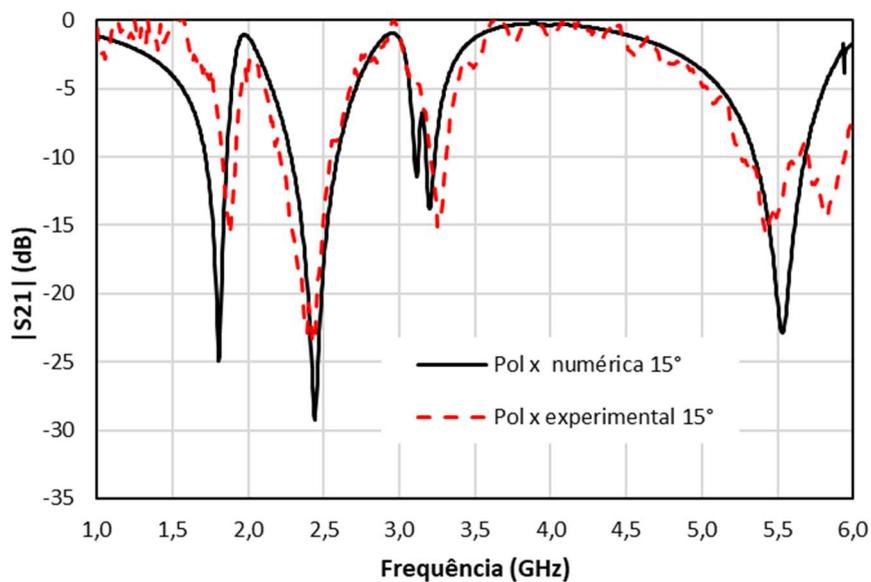
As Figuras 69-72 apresentam os resultados para a FSS 10 (40mm × 40mm), polarização x. Infelizmente, para essa FSS os dados da polarização y, não foram preservados. Entretanto, considerando a quantidade de dados existentes, essa falta não compromete a análise dos dados. A Tabela 10 resume os dados obtidos para a FSS 10.

Figura 69 – Comparação de respostas em frequência da polarização x, $\theta = 0^\circ$, FSS 10 (40 mm × 40 mm)



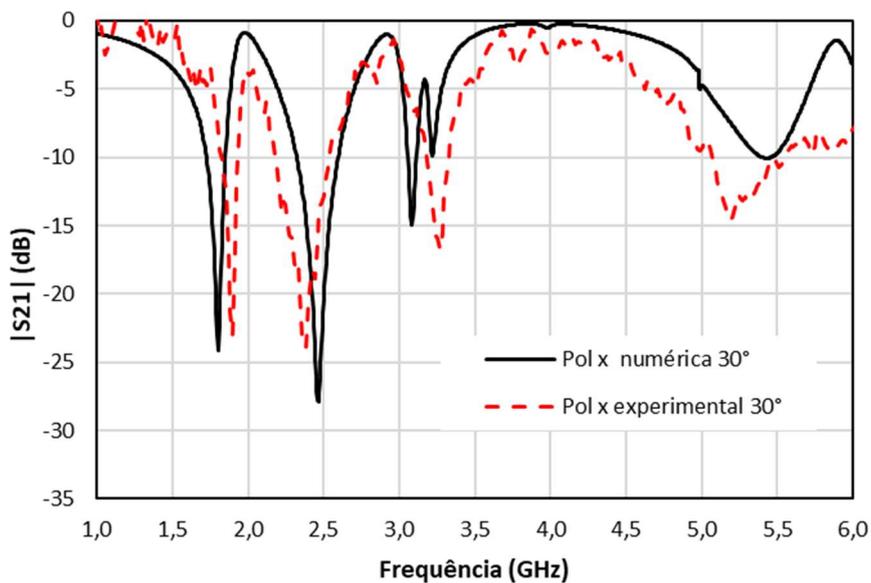
Fonte: Autor

Figura 70 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 15^\circ$, FSS 10 (40 mm \times 40 mm)



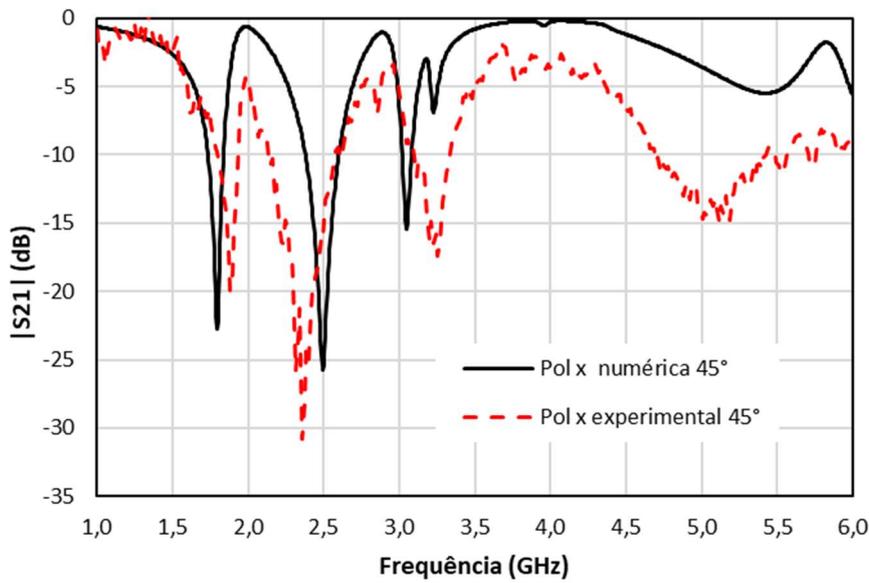
Fonte: Autor

Figura 71 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 30^\circ$, FSS 10 (40 mm \times 40 mm)



Fonte: Autor

Figura 72 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 45^\circ$, FSS 10 (40 mm \times 40 mm)



Fonte: Autor

Tabela 10 – Comparação dos resultados numéricos com os experimentais, geometrias associadas, FSS 10 (40 mm \times 40 mm)

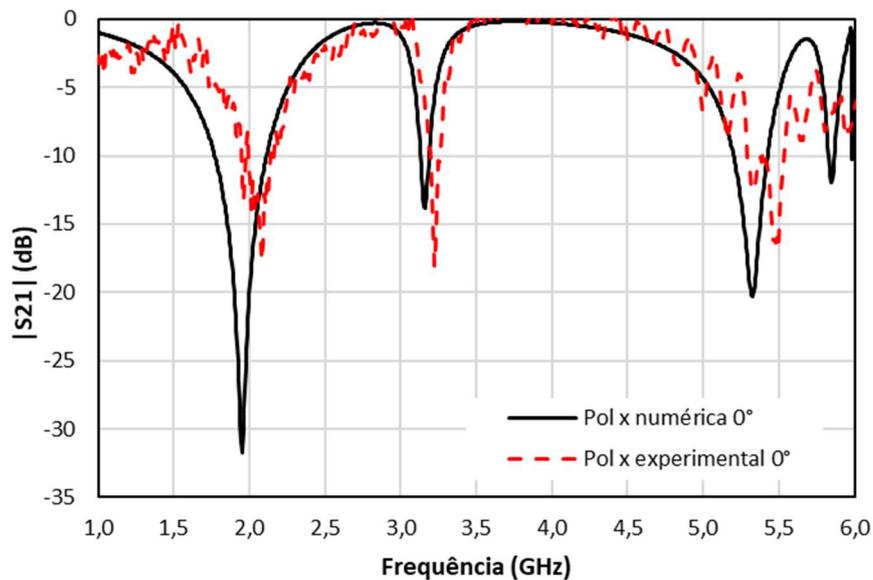
Ângulo	0°	15°	30°	45°
	Pol. x	Pol. x	Pol. x	Pol. x
F_{res1} num. (GHz)	1,81	1,81	1,81	1,80
F_{res1} exp. (GHz)	1,88	1,88	1,88	1,90
Diferença (%)	3,83	4,09	4,09	5,06
F_{res2} num. (GHz)	2,43	2,42	2,42	2,46
F_{res2} exp. (GHz)	2,44	2,43	2,43	2,39
Diferença (%)	0,49	0,33	0,33	3,10
F_{res3} num. (GHz)	3,19	3,21	3,21	3,05
F_{res3} exp. (GHz)	3,25	3,25	3,25	3,08
Diferença (%)	2,12	1,35	1,35	0,97

Da análise apenas da polarização x , observa-se que as ressonâncias correspondentes à geometria matrioska permaneceram praticamente constante e que a ressonância correspondente à geometria dipolo cruzados foi reduzida em aproximadamente 0,5 GHz.

As Figuras 73-76 apresentam os resultados para a FSS 11 (50 mm \times 50 mm), polarização x . Inicialmente, para $\theta = 0^\circ$, Figura 73, destaque-se que a primeira ressonância relativa à geometria matrioska e a ressonância referente à geometria dipolos cruzados

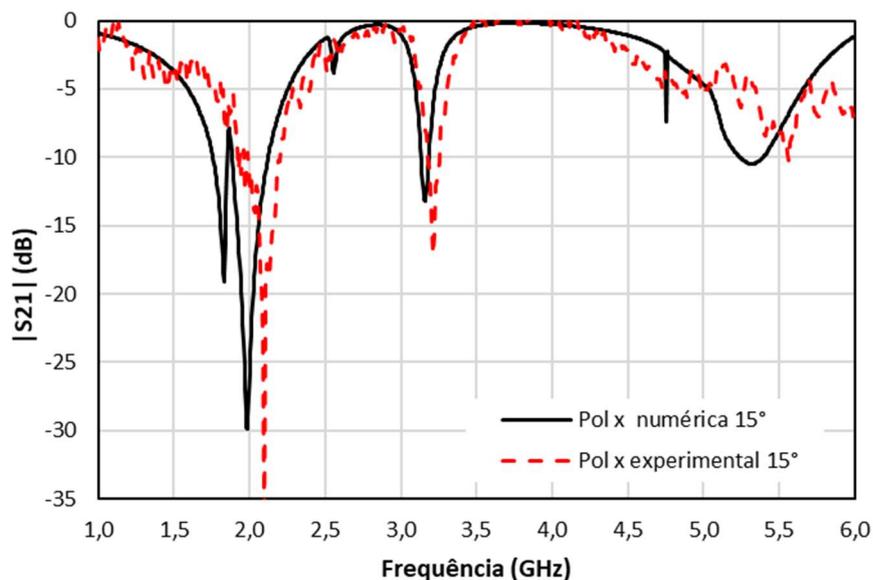
degeneraram-se em uma única ressonância. Para os demais ângulos de inclinação considerados, passa a ser observada uma variação na região da primeira frequência de ressonância possivelmente um desacoplamento entre as duas ressonâncias, ou um modo de grade. Contudo, de uma maneira geral, observa-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e os medidos.

Figura 73 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 0^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm)



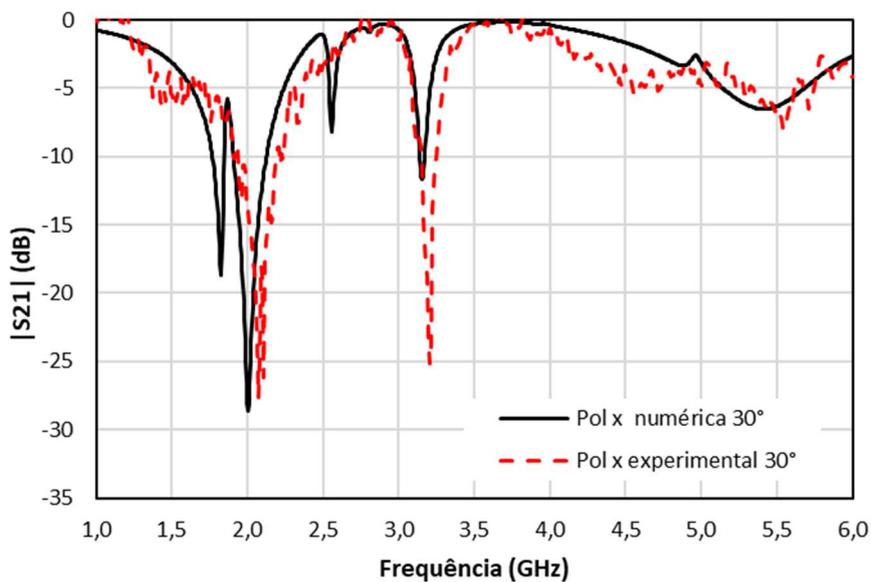
Fonte: Autor

Figura 74 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 15^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm)



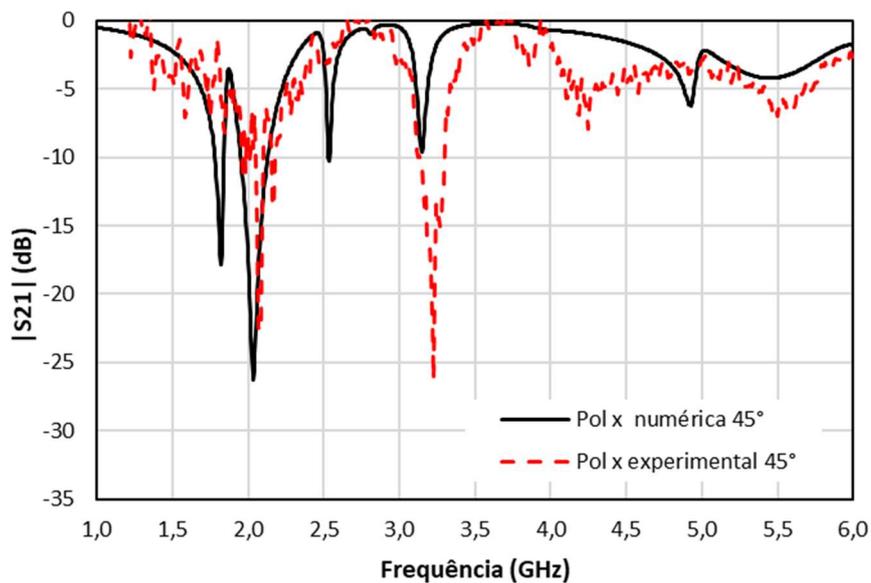
Fonte: Autor

Figura 75 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 30^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm)



Fonte: Autor

Figura 76 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 45^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm)



Fonte: Autor

As Figuras 77-80 apresentam os resultados para a FSS 11 (50 mm \times 50 mm), polarização y . O comportamento observado para a resposta em frequência é semelhante ao da

polarização x , verificando-se da mesma forma uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos. A Tabela 11 resume os dados obtidos para a FSS 11.

Figura 77 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 0^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm)

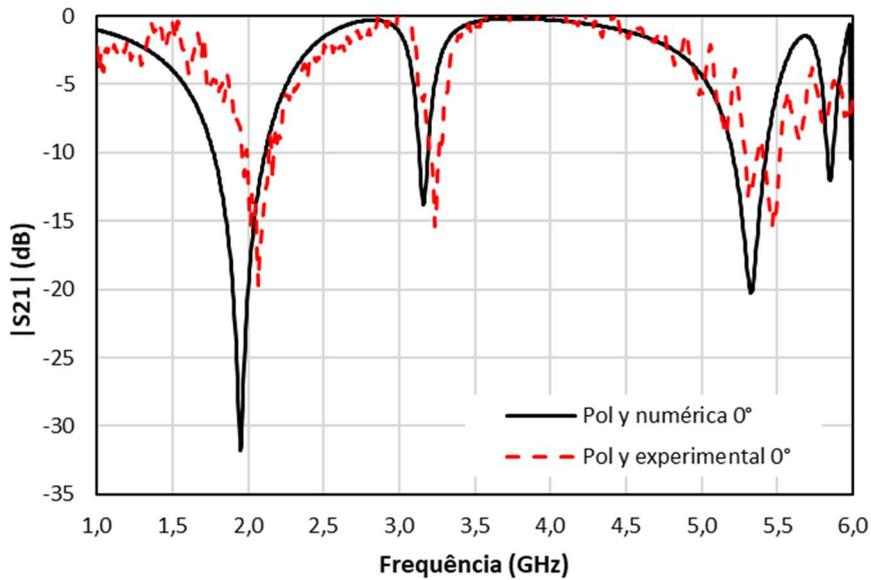


Figura 78 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 15^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm)

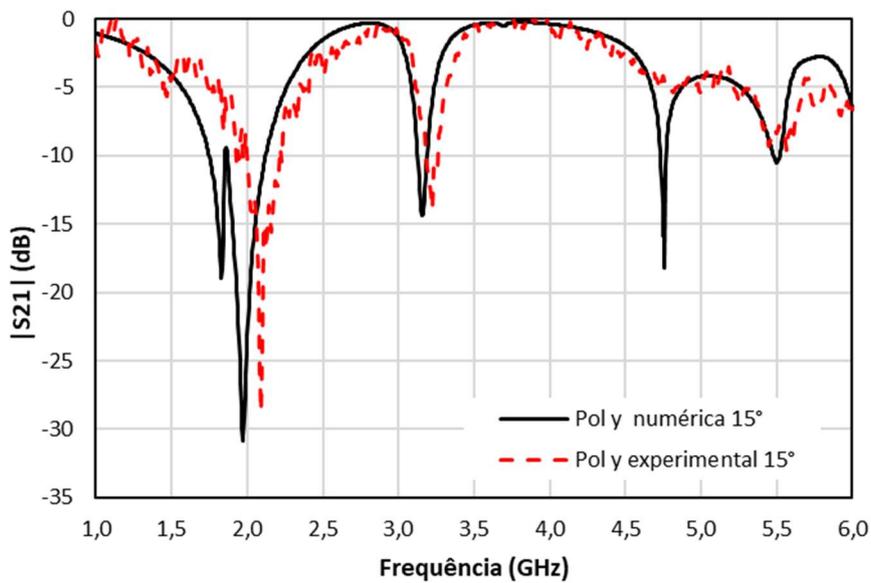
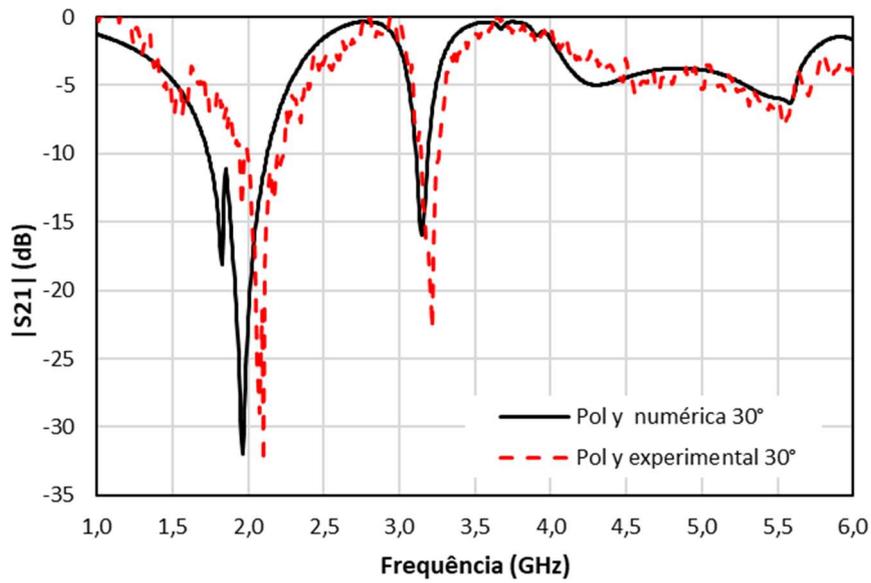
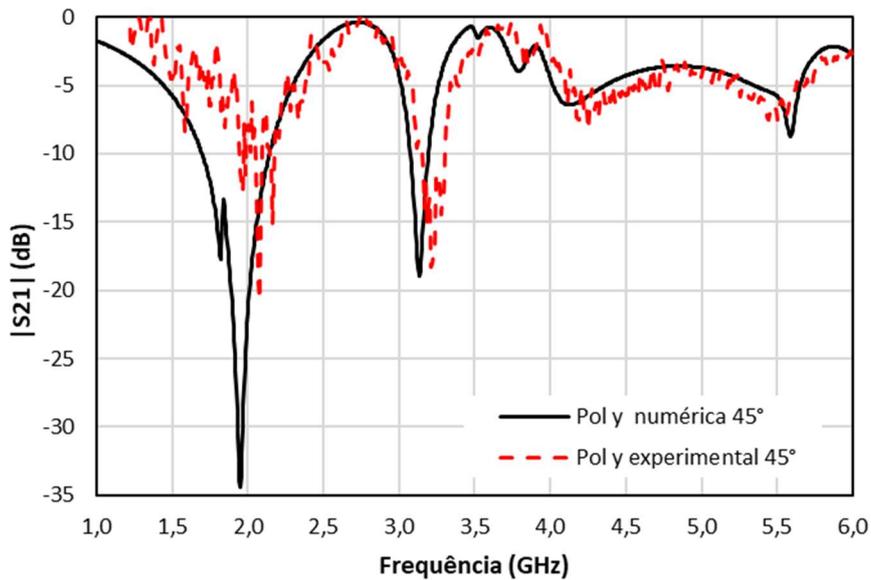


Figura 79 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 30^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm)



Fonte: Autor

Figura 80 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 45^\circ$, FSS 11 (50 mm \times 50 mm)



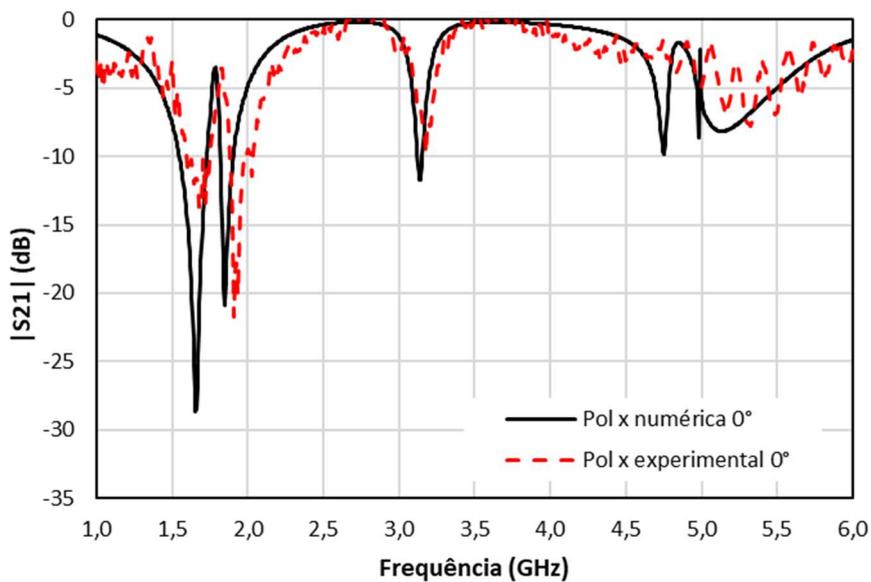
Fonte: Autor

Tabela 11 – Comparação dos resultados numéricos com os experimentais, geometrias associadas, FSS 11 (50 mm × 50 mm)

Ângulo	0°	0°	15°	15°	30°	30°	45°	45°
	Pol. x	Pol. y						
F _{res1} num. (GHz)	1,66	1,95	1,95	1,83	1,83	1,83	1,83	1,82
F _{res1} exp. (GHz)	1,79	2,02	1,96	2,09	2,04	2,07	2,07	2,08
Diferença (%)	7,65	3,32	0,66	12,40	10,07	11,88	11,88	12,50
F _{res2} num. (GHz)	2,96	1,95	1,95	1,97	1,97	2,01	1,96	2,04
F _{res2} exp. (GHz)	2,91	2,07	2,08	2,09	2,10	2,10	2,11	2,08
Diferença (%)	1,79	5,84	6,25	5,70	6,10	4,43	6,98	2,16
F _{res3} num. (GHz)	3,38	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,15	3,15
F _{res3} exp. (GHz)	3,45	3,23	3,22	3,22	3,21	3,21	3,21	3,21
Diferença (%)	1,66	2,23	1,95	2,11	1,84	1,84	1,87	2,15

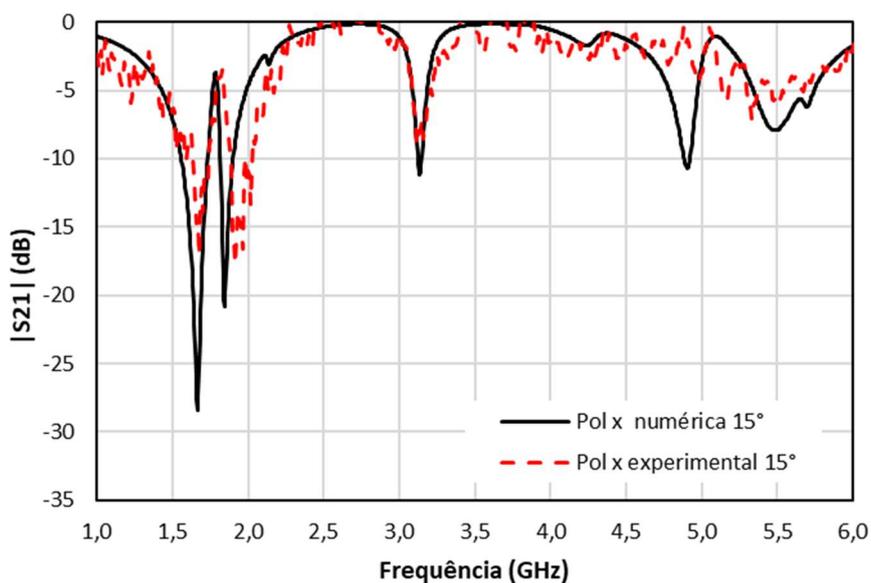
As Figuras 81-84 apresentam os resultados para a FSS 12 (60 mm × 60 mm), polarização x. Inicialmente, para $\theta = 0^\circ$, Figura 81, observa-se que as primeiras ressonâncias, 1,66 GHz (numérico) e 1,79 GHz (experimental), passam a ser relativa à geometria dipolos cruzados. Para os demais ângulos de inclinação considerados, verifica-se que as frequências de ressonância permanecem praticamente constantes. De um modo de geral, observa-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e os medidos, exceto para o ângulo de 45°, início da faixa de frequência, pelas limitações já comentadas.

Figura 81 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 0^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm)



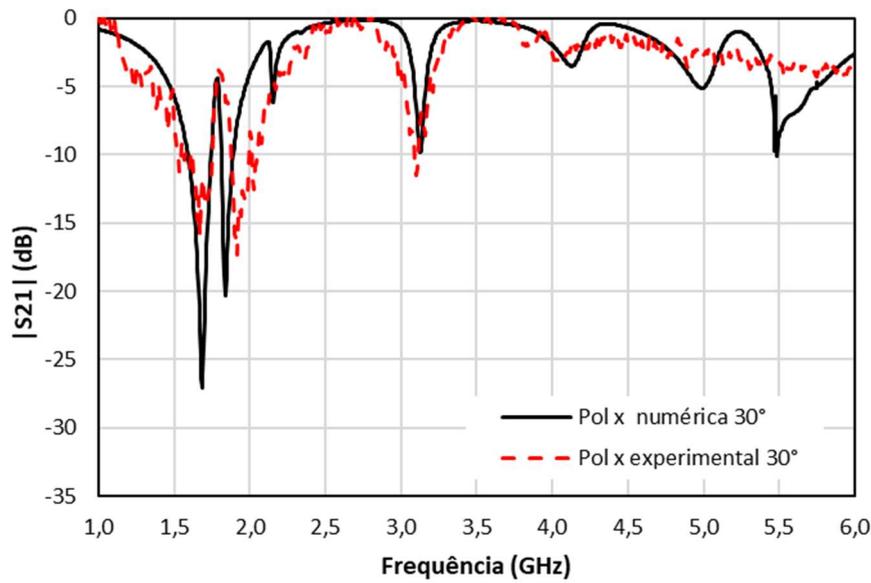
Fonte: Autor

Figura 82 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 15^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm)



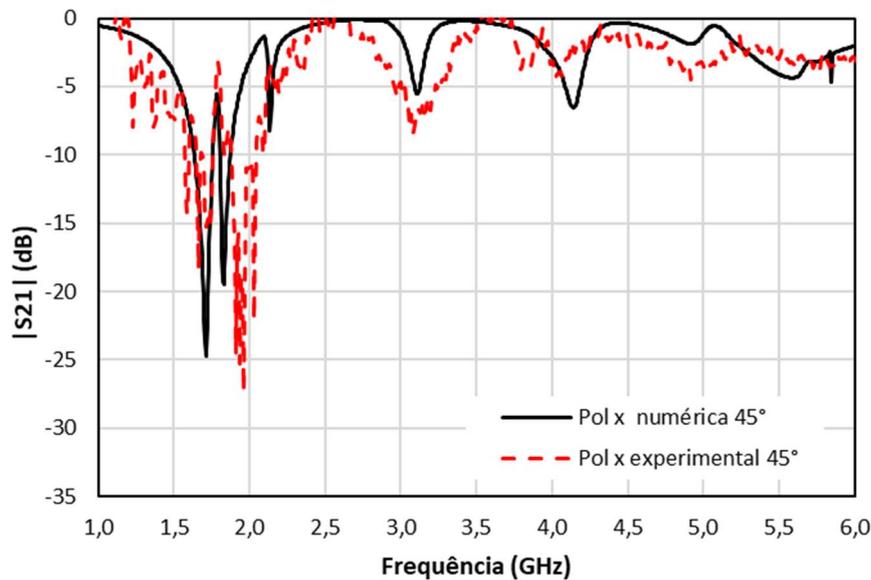
Fonte: Autor

Figura 83 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 30^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm)



Fonte: Autor

Figura 84 – Comparação de respostas em frequência da polarização x , $\theta = 45^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm)



Fonte: Autor

As Figuras 85-88 apresentam os resultados para a FSS 12 (60 mm \times 60 mm), polarização y . O comportamento observado para a resposta em frequência é semelhante ao da polarização x , verificando-se da mesma forma uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos. A Tabela 12 resume os dados obtidos para a FSS 12.

Figura 85 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 0^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm)

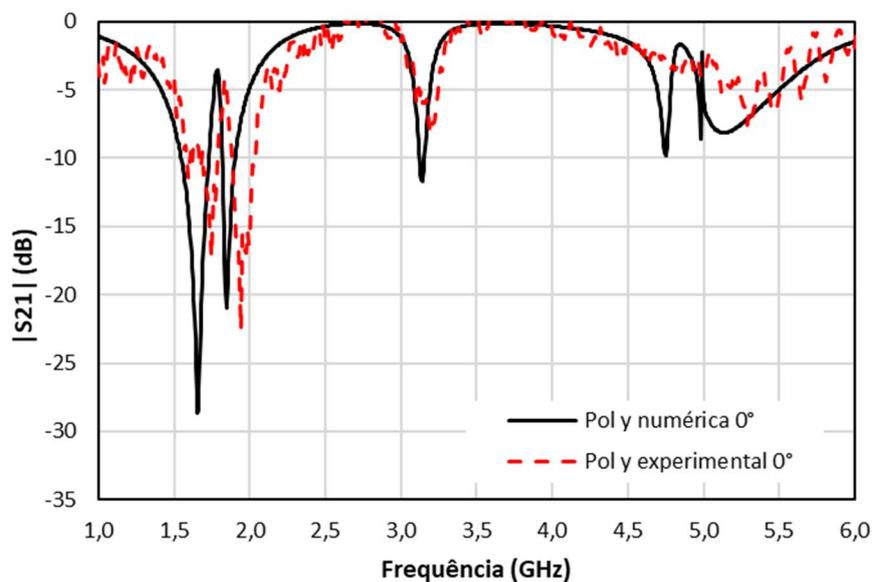


Figura 86 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 15^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm)

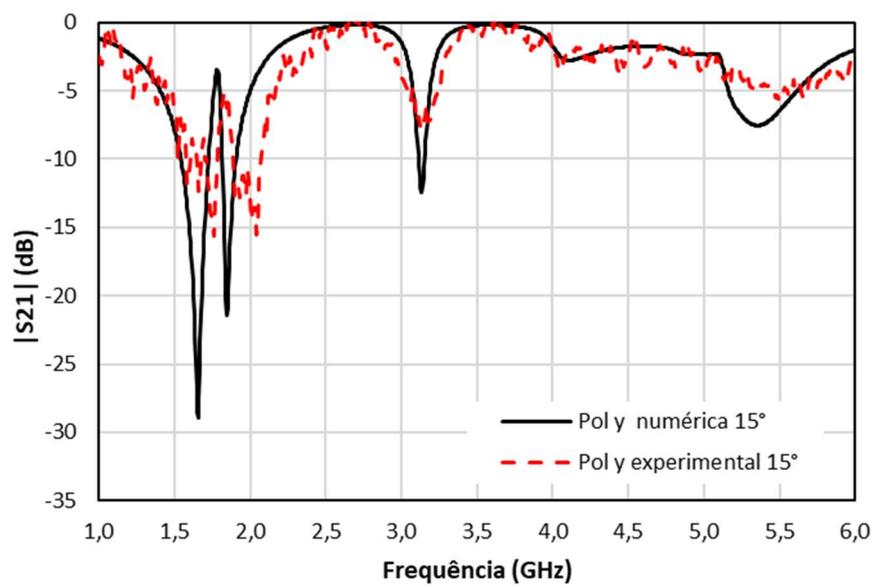
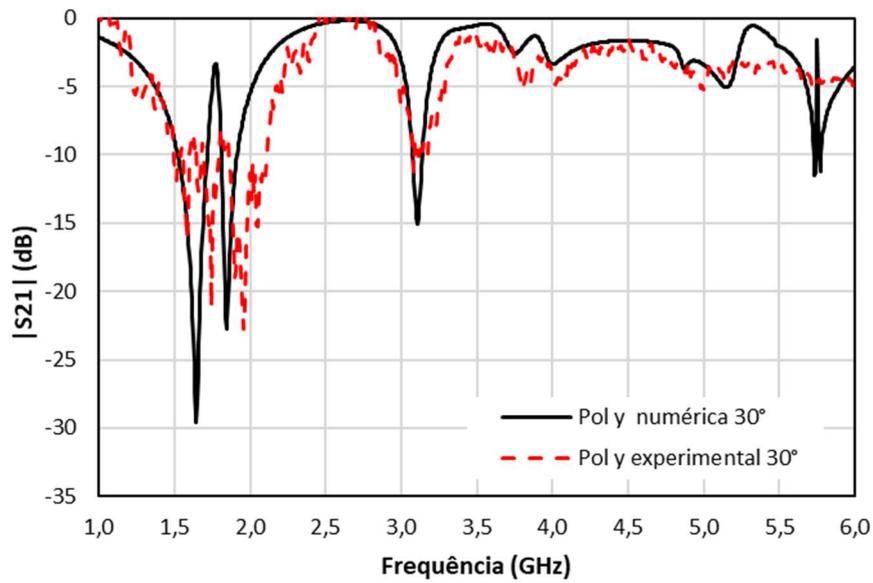
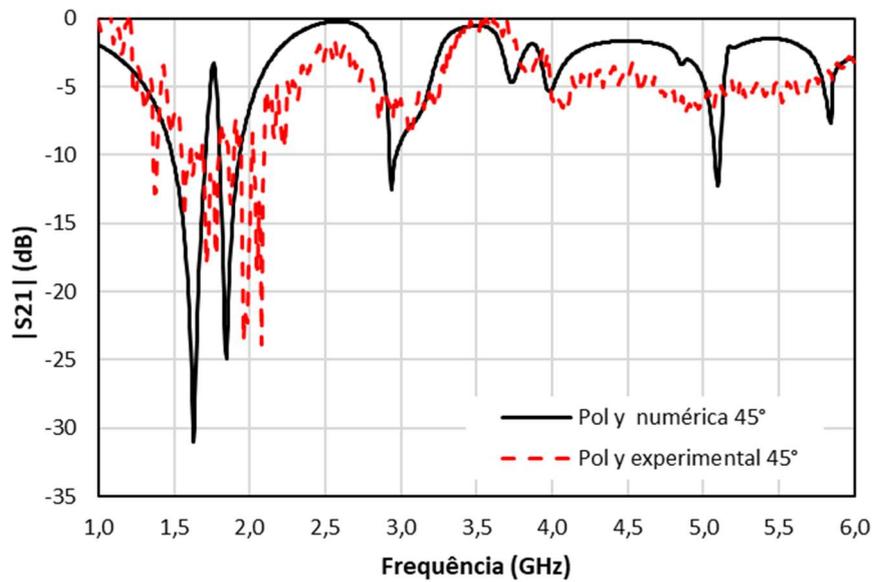


Figura 87 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 30^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm)



Fonte: Autor

Figura 88 – Comparação de respostas em frequência da polarização y , $\theta = 45^\circ$, FSS 12 (60 mm \times 60 mm)



Fonte: Autor

Tabela 12 – Comparação dos resultados numéricos com os experimentais, geometrias associadas, FSS 12 (60 mm × 60 mm)

Ângulo	0°	0°	15°	15°	30°	30°	45°	45°
	Pol. x	Pol. y						
F _{res1} num. (GHz)	1,66	1,66	1,66	1,67	1,66	1,69	1,65	1,71
F _{res1} exp. (GHz)	1,79	1,75	1,68	1,76	1,68	1,75	1,67	1,71
Diferença (%)	7,65	5,27	1,72	5,18	1,19	3,55	1,32	0,06
F _{res2} num. (GHz)	2,96	1,85	1,85	1,85	1,85	1,86	1,85	1,83
F _{res2} exp. (GHz)	2,91	1,95	1,91	2,04	1,92	1,95	1,92	1,96
Diferença (%)	1,79	5,14	3,35	9,49	3,81	5,07	3,81	7,03
F _{res3} num. (GHz)	3,38	3,14	3,14	3,15	3,14	3,13	3,11	3,11
F _{res3} exp. (GHz)	3,45	3,20	3,18	3,12	3,12	3,08	3,10	3,05
Diferença (%)	2,12	1,75	1,20	0,67	0,64	1,49	0,42	1,90

De uma maneira geral verificou-se que:

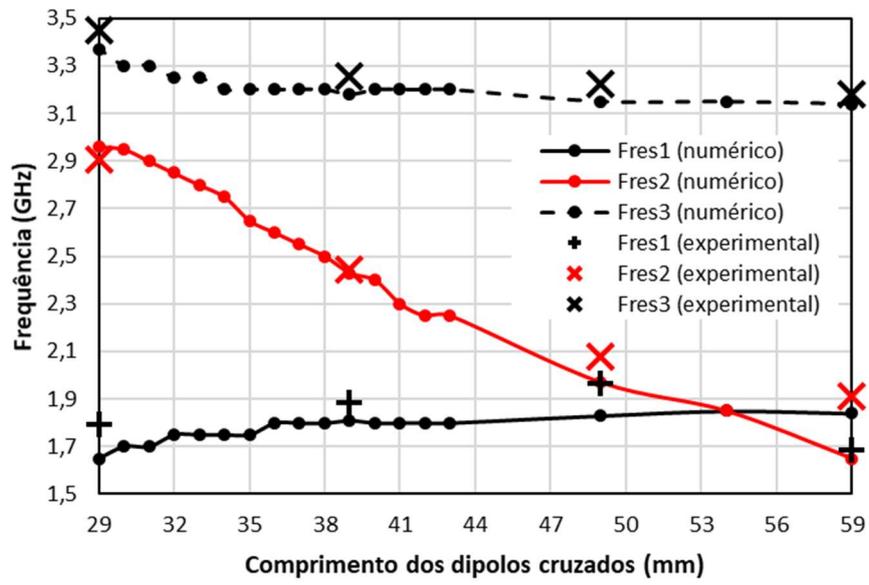
- A FSS com a geometria proposta é independente da polarização e do ângulo de incidência;
- Foi possível ajustar a frequência de ressonância relativa aos dipolos cruzados sem alterar as frequências de ressonância relativas à geometria matrioska.

4.3. Análise do acoplamento entre as geometrias associadas

Com o objetivo de analisar o efeito da variação das dimensões dos dipolos cruzados, e consequentemente da célula unitária, para uma dada dimensão da geometria matrioska, foi feita uma variação do comprimento dos dipolos de 29 mm, ou seja, próximo das dimensões da matrioska, até 59 mm. Esses resultados são apresentados na Figura 89, sendo considerada apenas a incidência perpendicular à FSS ($\theta = 0^\circ$).

Na Figura 89 verifica-se que, exceto para quando os dipolos cruzados têm uma dimensão muito próxima à da matrioska, $29 \text{ mm} \leq L_{dip} \leq 32 \text{ mm}$, é possível alterar a respectiva frequência de ressonância, sem alterar as frequências de ressonância relativas à geometria matrioska.

Figura 89 – Frequência de ressonância × Comprimento dos dipolos cruzados



Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO

5.1. Conclusões

Neste trabalho foi proposta fazer a caracterização das FSS com geometrias dipolos cruzados e matrioska e então das duas associadas associadas. Foram caracterizadas quatro FSS para cada geometria variando o tamanho das células unitárias e fazendo a análise e comparação com os resultados entre os valores numéricos e os calculados pelas equações teóricas.

O objetivo da associação dessas geometrias foi investigar a possibilidade de ajustar a frequência de ressonância relativa aos dipolos cruzados, sem alterar as frequências de ressonâncias relativas à geometria matrioska.

Foram descritos os procedimentos de projeto das geometrias dipolos cruzados e matrioska e suas principais característica, destacando-se a independência da polarização e do ângulo de incidência.

Na caracterização numérica da geometria dipolo cruzado foi variado as dimensões da geometria em conjunto com a variação da célula unitária, obtendo um deslocamento na frequência de ressonância quando comparado os resultados de uma FSS para a outra.

Na caracterização numérica da geometria matrioska a geometria foi mantida a mesma para as quatro FSS, variando o tamanho da célula e confirmando as frequências de ressonância serem semelhantes entre elas, mas não iguais, fazendo o estudo do tamanho da célula importante.

Na caracterização numérica das geometrias associadas foi possível ver as frequências de ressonância relativas as geometrias respectivas e o deslocamento da frequência de ressonância relativa a geometria dipolos cruzados em relação a constância das frequências de ressonância relativa a geometria matrioska

Quatro FSS foram projetadas, todas com a mesma dimensão para a geometria matrioska, mas variando as dimensões dos dipolos cruzados. A caracterização experimental das geometrias associadas foi comparada com os resultados numéricos e possível ver uma boa concordância e o desacoplamento entre as geometrias.

Finalizando, foi feita uma análise numérica da influência da variação do comprimento dos dipolos cruzados na frequência de ressonância, confirmando o desacoplamento entre as geometrias associadas.

5.2. Trabalhos futuros

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

- Investigar o controle da geometria matrioska, mantendo o dipolo cruzado constante;
- Usar elementos ativos (Diodos PIN e varactores) nos espaçamentos dos dipolos cruzados;
- Analisar o ajuste da largura de banda;
- Investigar novas geometrias que sejam independentes de polarização e sem acoplamento entre elas.

5.3. Trabalhos Publicados

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

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

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

A. G. Neto, J. C. e Silva, I. B. G. Coutinho, M. de Oliveira Alencar, D. M. de Andrade, "Superfície Seletiva em Frequência com Três Bandas de Rejeição com Aplicação à Faixa de 2,4 GHz" *2019 37º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, Petrópolis, Rio de Janeiro, 2019

REFERÊNCIAS

- [1] Shayea, Ibraheem & Bin Azmi, Marwan & Abd Rahman, Tharek & Ergen, Mustafa & Chua, Tien Han & Arsad, Arsany. (2019). Analysis of Technology Trends, Future Needs and Demands for Mobile Broadband Spectrum in Malaysia. IEEE Access. PP. 1-23. 10.1109/ACCESS.2018.2890302.
- [2] Cisco Visual Networking, “Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2017–2022” <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>. [Acesso em 6 de março 2019]
- [3] Cablefree “5G Frequency bands: Spectrum Allocations for Next-Gen LTE”, <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/5g-frequency-bands-lte/> [Acesso em 12 de março de 2019].
- [4] PROJECT-TEAM SOCRATE Software and Cognitive radio for telecommunications in collaboration with: Centre of Innovation in Telecommunications and Integration of services. **Activity Report**. Grenoble/Rhône-Alpes, 2017.
- [5] A. Gomes Neto, A. G. D’Assunção Junior, J. C. Silva, I. S. S. Lima, L. C. M. d. Moura, R. G. G. d. Carvalho, “Ajuste da resposta em frequência de FSS com geometria estrela de quatro braços”, Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo – MOMAG2014, Curitiba, 2014.
- [6] S. Habib, G. I. Kiani, and M. F. U. Butt, “Interference mitigation and WLAN efficiency in modern buildings using energy saving techniques and FSS,” in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Fajardo, Puerto Rico, July, 1, 2016, pp. 965–966.
- [7] Q. Zeng, J. Li and T. Denidni, "Solution for Overcoming Interference - Radiation Pattern Reconfigurable Antennas," *2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Cartagena des Indias, 2018, pp. 961-965.
- [8] Jiayin Roberts, **Design of a Secure Electromagnetic Building**, PhD Thesis, THE University of Sheffield, Sheffield, UK, June, 2014.
- [9] T. da S. Evangelista, “**Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços para Aplicação em 2,4 GHz**”, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2017
- [10] T. R. de Sousa, “**Desenvolvimento de Superfície Seletiva em Frequência Baseada na Geometria Matrioska Independente da Polarização**”, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2019.
- [11] Moura, L. C. M., **Caracterização de FSS com Geometria Estrela de Quatro Braços Tipo Fenda**, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2015.

- [12] M. Gustafsson, A. Karlsson, A. P. P. Rebelo and B. Widenberg, "Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 6, pp. 1897–1900, June 2006.
- [13] L. Subrt, P. Pechac, A. Vallecchi, L. Ford, R. Langley, J. Rigelsford, "Advanced modelling of intelligent walls for indoor smart environments," , *2014 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Hague, Netherlands, April 6–11, 2014, pp. 620–622.
- [14] A. A. Dewani, S. G. O’Keefe, D. V. Thiel and A. Galehdar, "Window RF Shielding Film Using Printed FSS," , *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 2, pp. 790-796, Feb. 2018.
- [15] M. Raspopoulos and S. Stavrou, "Frequency selective buildings through frequency selective surfaces," , *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 8, pp. 2998– 3005, Aug. 2011.
- [16] A. Gomes Neto, J. C. Silva, T. S Evangelista, "Desenvolvimento de superfície seletiva em frequência reconfigurável baseada na geometria estrela de quatro braços para aplicação em 2,4 GHz", in *II Simpósio de Pós-Graduação e Inovação do IFPB (SIMPIF) 2017*, João Pessoa, novembro 2017, p. 498–499.
- [17] UmCOMO "Qual é a história das matrioskas, as bonecas russas?" <https://educacao.umcomo.com.br/artigo/qual-e-a-historia-das-matrioskas-as-bonecas-russas-6266.html> [Acesso em 28 de abril de 2019]
- [18] A. Gomes Neto, A. G. DAssunção Junior, J. C. e Silva, J. do N. Cruz, J. B. de O. Silva, N. J. de L. Ramos, "Multiband frequency selective surface with open Matryoshka elements," , in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisbon, Portugal, April 2015, pp. 1–5.
- [19] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, J. N.de Carvalho, J. do N. Cruz, H. de P. A. Ferreira, "Analysis of the resonant behavior of FSS using Matryoshka geometry," , in *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas, Brazil, Nov. 2015, pp. 1–5.
- [20] A. G. Neto, T. R. de Sousa, J. C. E. Silva and D. F. Mamedes, "A Polarization Independent Frequency Selective Surface Based on the Matryoshka Geometry," *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, Philadelphia, PA, 2018, pp. 999-1002.
- [21] Hang, Zhou & Shao-Bo, Qu & Wei-Dong, Peng & Wang, Jiafu & Ma, Hua & Jie-Qiu, Zhang & Peng, Bai & Zhuo, Xu. (2012). Dual-band frequency selective surface with quasi-elliptic bandpass response. *Chinese Physics B*. 21. 030301. 10.1088/1674-1056/21/3/030301.
- [22] M. Mahmoodi and K. M. Donnell, "Novel FSS-based sensor for concurrent temperature and strain sensing," *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, CA, 2017, pp. 679-680.

- [23] B.A. Munk, **Frequency-Selective Surfaces: Theory and design**, Wiley, New York, 2000.
- [24] A. L. P. de S. Campos, “**Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e Projeto**”. Editora do IFRN, Natal (2009).
- [25] A. N. da Silva, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de U**, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [26] P. H. F. Silva, A. L. P. S. Campos e E. E. C. Oliveira, “Design of miniaturized frequency selective surfaces using Minkowski Island fractal,” *Journal of Microwaves, Opt. Electromagnetic Applications*, vol. 9, no. 1, 2010.
- [27] H. V. H. e Silva Filho, **Superfície Seletiva de Frequência Multibanda Baseada na Geometria Cruz de Jerusalém**, Recife: Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação de Mestrado, 2018.
- [28] B. Sanz-Izquierdo and E. Parker, “Dual polarized reconfigurable frequency selective surfaces,” *Antennas and Propagation, IEEE Access*, 2014.
- [29] D. Ferreira, I. Cuiñas, R. F. S. Caldeirinha and T. R. Fernandes, "3-D Mechanically Tunable Square Slot FSS," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 1, pp. 242-250, Jan. 2017. doi: 10.1109/TAP.2016.2631131
- [30] D. B. Webb, E. Michielssen and R. Mittra, "Thick frequency selective surfaces," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest*, Chicago, IL, USA, 1992, pp. 1795-1798 vol.4.
- [31] P. Harms, R. Mittra and Wai Ko, "Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 9, pp. 1317-1324, Set. 1994.
- [32] Brandx00E3o, T. H. et al. “FSS-based dual-band cassegrain parabolic antenna for RadarCom applications.” 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC) (2017)
- [33] Duan, Zhonghang & Abomakhleb, Gheit & Lu, Guizhen. (2019). Perforated Medium Applied in Frequency Selective Surfaces and Curved Antenna Radome. *Applied Sciences*. 9. 1081. 10.3390/app9061081.
- [34] J. B. O. Silva, **Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequência com Banda Dupla de Operação Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços Associada a Anéis Trapezoidais**, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2016
- [35] R. Dubrovka, J. Vazquez, C. Parini and D. Moore, "Multi-frequency and multi-layer frequency selective surface analysis using modal decomposition equivalent circuit method," in *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 3, no. 3, pp. 492-500, April 2009.

- [36] A. Fallahi, M. Mishrikey, C. Hafner and R. Vahldieck, "Efficient Procedures for the Optimization of Frequency Selective Surfaces," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 5, pp. 1340-1349, May 2008.
- [37] W. C. Gibson, **The Method of Moments in Electromagnetics**, Chapman & Hall /CRC, New York, 2008.
- [38] M. N. O. Sadiku, **Elementos de Eletromagnetismo**, Bookman, Brasil, 2012.
- [39] J. L. Volaskis, A. Chatterjee, and L. C. Kempel, **Finite Element Method for Electromagnetics, Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications**, Wiley-IEEE Press, USA, 1998.
- [40] T. Itoh, G. Pelosi and P. P. Silvester, **Finite Element Software for Microwave Engineering**, Wiley, New York, 1996.
- [41] P. Harms, R. Mittra and W. Ko, "Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 9, pp. 1317–1324, September 1994.
- [42] N. Kaneda, B. Houshmand and T. Itoh, "FDTD analysis of dielectric resonators with curved surfaces," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 9, pp. 1645–1649, September 1997
- [43] M. Titaouine, N. Raveu, A. G. Neto, and H. Baudrand, "The WCIP method: Theory and applications," *Advances in Engineering Research*, vol. 6, pp. 143–176, December 2008.
- [44] M. Titaouine, A. G. Neto, H. Baudrand, and F. Djahli, "WCIP method applied to active frequency selective surfaces," *Journal of Microwaves*, vol. 6, no. 1, pp. 1–16, June 2007.
- [45] ALMEIDA FILHO, V. A. **Arranjos Log-Periódicos Compactos em Microfita com Elementos Fractais de Koch**, p. 27. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2010.
- [46] E. F. Harris, "An experimental investigation of the corner-reflector antenna," *Proceedings of the IRE*, vol. 41, no. 5, pp. 645-651, May 1953.
- [47] Agilent Technologies. (2002, setembro) RF & Microwave AppCAD