



Thayuan Rolim de Sousa

**Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em
Frequência Baseadas na Geometria Matrioska
Independente da Polarização**

**João Pessoa - PB
Janeiro de 2019**



Thayuan Rolim de Sousa

Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequência Baseadas na Geometria Matrioska Independente da Polarização

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

Área de Concentração: Telecomunicações
Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Alfrêdo Gomes Neto, Dr.
Orientador

Jefferson Costa e Silva, Dr.
Coorientador

João Pessoa – PB, Janeiro de 2019
©Thayuan Rolim de Sousa – thayuan.rolim@gmail.com

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

S725d Sousa, Thayuan Rolim de.
Desenvolvimento de superfícies seletivas em frequência baseadas na geometria matrioska independente da polarização / Thayuan Rolim de Sousa. – 2019.
53 f. :il.
Dissertação (Mestrado - Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.
Orientação: D.r Alfrêdo Gomes Neto.
1. Engenharia elétrica - sistema de comunicação. 2. Superfície seletiva em frequência (FSS). 3. Geometria matrioska. I. Título.
CDU 621.3(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária
CRB 15/132

Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequência Baseadas na Geometria Matrioska Independente de Polarização

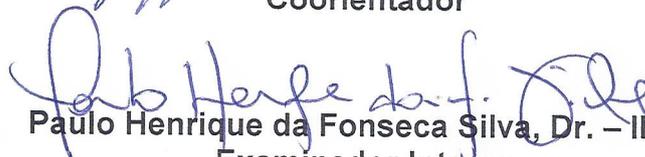
Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 23/01/2019.

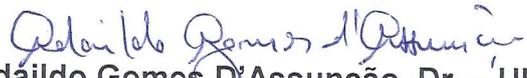
BANCA EXAMINADORA


Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Orientador


Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Coorientador


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


Adaildo Gomes D'Assunção Júnior, Dr. – IFPB
Examinador Interno


Adaildo Gomes D'Assunção, Dr. – UFRN
Examinador Externo

João Pessoa – PB
Janeiro de 2019

A Deus.

Aos meus pais.

Agradecimentos

Desde pequeno sempre soube que nenhuma realização ou nenhum sonho seria alcançado de modo fácil, mas com a ajuda de familiares e de amigos, qualquer dificuldade poderia ser superada. Nesse momento quero agradecer a todos que contribuíram por mais essa conquista. Gostaria de agradecer a:

Dr. Alfrêdo Gomes, por ser um orientador sempre disposto a ajudar. Nunca me esquecerei dos conselhos e toda a paciência que o senhor sempre teve comigo. Sou grato de coração a todos os seus esforços.

Aos professores do PPgEE/IFPB, em especial a Dr. Jefferson Silva, Dr. Joabson Nogueira, pelas orientações e incentivos durante o curso.

Aos meus pais e irmãos, pelo amor, cuidado e dedicação em todos os momentos.

Aos meus amigos, em especial a Deisy Mamedes e Thamyris Evangelista, por todo apoio que me deram. Espero que possamos estar sempre juntos.

A todos os amigos do mestrado que sempre estiveram juntos, compartilhando alegrias e decepções, essenciais para alcançarmos nosso objetivo.

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo”

Winston Churchill

Resumo

A utilização das superfícies seletivas em frequência, FSS, tem sido investigada como forma de aumentar a eficiência dos sistemas de comunicação. Em trabalhos recentes, a geometria matrioska foi implementada em FSS, com características interessantes, destacando a miniaturização e a operação multibanda. No entanto, essa geometria é dependente de polarização, o que a torna inviável para algumas aplicações. Para superar essa desvantagem, neste trabalho é apresentada uma FSS independente de polarização, baseada na geometria matrioska. As equações iniciais de projeto são propostas, alcançando bons resultados. Cinco FSS foram projetadas, fabricadas e caracterizadas numericamente e experimentalmente, verificando-se uma boa concordância entre resultados numéricos e experimentais. Quando comparado com a geometria do anel circular, uma redução na frequência de ressonância de até 49% foi atingida. A variação do ângulo de incidência considerada, de 0° a 45° , confirma a estabilidade da frequência de ressonância, ampliando as possíveis aplicações da geometria matrioska.

Palavras chave: FSS, geometria matrioska, miniaturização, multibanda, independência da polarização.

Abstract

The utilization of frequency selective surfaces, FSS, has been investigated as a form to increase the efficiency of communication systems. In recently works, the matryoshka geometry was applied on FSS with interesting characteristics as miniaturization and multiband operation. However, this geometry is polarization dependent, which is a drawback for some applications. To overcome this disadvantage, in this work is proposed a polarization independent FSS based on matryoshka geometry. Initial equations to design are proposed, achieving good results. Five FSS were manufactured and characterized, with a good agreement between the numerical and experimental results. When it is compared with the circular ring geometry, the resonant frequency was reduced up to 49%. The variation of angle of incidence considered, from 0° to 45° , confirms the frequency response stability, increasing the matryoshka geometry applications.

Keywords: FSS, matryoshka geometry, miniaturization, multiband, polarization independence.

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 — Aplicações que utilizam redes de comunicação sem fio.....	15
Figura 1.2 — Torre com antenas para diversas aplicações.	16
Figura 1.3 — Exemplos de bonecas matrioska [8].....	16
Figura 1.4 — Geometria matrioska [6].	17
Figura 2.1 — Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS	18
Figura 2.2 — FSS do tipo <i>patch</i>	19
Figura 2.3 — FSS do tipo abertura.....	19
Figura 2.4 — Elementos do grupo 1 [14].....	20
Figura 2.5 — Elementos do grupo 2 [14].....	20
Figura 2.6 — Elementos do grupo 3 [14].....	21
Figura 2.7 — Elementos do grupo 4 [14].....	21
Figura 2.8 — Geometrias investigadas no GTEMA-IFPB.	21
Figura 2.9 — Representação de uma FSS de anteparo fino.....	22
Figura 2.10 — Representação de uma FSS com duas camadas de metalização. ..	23
Figura 2.11 — Exemplos de FSS.....	23
Figura 2.12 — Aplicação da FSS no forno micro-ondas.	24
Figura 2.13 — Aplicação da FSS em radomes [39], [40].	25
Figura 2.14 — Aplicação de FSS em antena refletora [37].	25
Figura 2.15 — Aplicação de FSS em janelas eficientes [42].....	26
Figura 2.16 — Atuação das paredes inteligentes em ambiente <i>indoor</i> [48].	26
Figura 2.17 — Modelo do circuito equivalente [20].	27
Figura 2.18 — <i>Setup</i> de medição para FSS.....	28
Figura 2.19 — Utilização de lentes no <i>setup</i> de medições [44].....	28
Figura 2.20 — Utilização da câmara anecóica no <i>setup</i> de medições [60].	29
Figura 2.21 — Janela de medição com absorvedores.	29
Figura 3.1 — Célula Básica da geometria matrioska.	30
Figura 3.2 — Dimensões da célula básica.	31
Figura 3.3 — Célula básica anel circular.....	32
Figura 3.4 — Largura da fita [47].....	32
Figura 3.5 — Célula básica um anel matrioska.....	32
Figura 3.6 — Célula básica dois anéis matrioska	33
Figura 4.1 — <i>Setup</i> de medição utilizado.....	34

Figura 4.2 — FSS fabricadas.....	35
Figura 4.3 — Resposta em frequência, FSS1 comparada com as FSS 2 e 3.....	35
Figura 4.4 — Resposta em frequência, FSS1.....	36
Figura 4.5 — Resposta em frequência, FSS2.....	37
Figura 4.6 — Resposta em frequência, FSS3.....	38
Figura 4.7 — FSS fabricadas.....	39
Figura 4.8 — Resposta em frequência, FSS4 comparada com a FSS5.	39
Figura 4.9 — Resposta em frequência, FSS4.....	40
Figura 4.10 — Resposta em frequência, FSS5.....	41
Figura 4.11 — Polarização dos anéis.....	42
Figura 4.12 — Densidade de corrente elétrica para as duas primeiras ressonâncias, um anel matrioska.....	42
Figura 4.13 — Densidade de corrente elétrica para as duas primeiras ressonâncias, dois anéis matrioska.....	43

Lista de Tabelas

Tabela 4.1. Resultados obtidos para a FSS1	36
Tabela 4.2. Resultados obtidos para a FSS2	37
Tabela 4.3. Resultados obtidos para a FSS3	38
Tabela 4.4. Resultados obtidos para a FSS4	40
Tabela 4.5. Resultados obtidos para a FSS5	41

Lista de Siglas

ANSYS	<i>Analysis Systems</i>
BW	Bandwidth (Largura de banda)
FDTD	Finite-Difference Time-Domain (Diferenças Finitas no Domínio do Tempo)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i>
FR- 4	Substrato composto de fibra de vidro e epóxi
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i> (Superfície Seletiva em frequência)
RFSS	Superfícies seletivas em frequência reconfiguráveis
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
L	Indutância
C	Capacitância
MoM	<i>Method of Moments</i> (Método dos Momentos)
WCIP	<i>Wave Concept Iterative Procedure</i> (Método Iterativo das Ondas)
$ S_{21} $	Parâmetro S, equivalente ao coeficiente de transmissão
λ_0	Comprimento de onda no espaço livre
h	Altura do substrato
ϵ_r	Constante dielétrica ou permissividade elétrica relativa
W_x	Comprimento da célula unitária ao longo do eixo x
L_y	Largura da célula unitária ao longo do eixo y
r_1	Raio do anel externo
r_d	Raios dos anéis internos
w	Largura da fita do anel
g	Largura da abertura

Sumário

1. Introdução	15
2. Superfícies Seletivas em Frequência.....	18
2.1 Classificações das FSS	19
2.1.1 Preenchimento da célula unitária	19
2.1.2 Geometria do elemento da célula	20
2.1.3 Espessura da camada de metalização	22
2.1.4 Reconfiguração dos arranjos	23
2.2 Aplicações de FSS	24
2.2.1 Anteparo da porta do forno de micro-ondas.....	24
2.2.2 Radomes.....	24
2.2.4 Janelas eficientes.....	25
2.2.5 Paredes inteligentes.....	26
2.3 Técnicas de Análise.....	26
2.3.1 Caracterização numérica	27
2.3.2 Caracterização experimental.....	28
3. Descrição do Projeto.....	30
3.1 Projeto da FSS	30
4. Resultados	34
5. Conclusão	44
5.1 Considerações finais	44
5.2 Trabalhos futuros.....	45
5.3 Trabalhos publicados.....	45
REFERÊNCIAS.....	46

CAPÍTULO 1

1. Introdução

Com a expansão dos sistemas de comunicação sem fio e a diversidade das suas aplicações, Figura 1.1, surgiu a necessidade de dispositivos que operem nas mais diversas faixas de frequência sem que haja interferência na realização de suas operações [1]–[3]. Essa demanda se torna um desafio contínuo para os engenheiros de telecomunicações no desenvolvimento de dispositivos que atendam características como: miniaturização, operação multibanda, independência de polarização, baixo custo de fabricação e facilidade na integração com outros sistemas.



Figura 1.1 — Aplicações que utilizam redes de comunicação sem fio.

Além da diversidade de serviços de telecomunicações, o crescimento do número de usuários de serviços móveis e o tráfego de informações cada vez mais intenso também exige a disponibilidade de enlaces de alta capacidade que possam conectar diferentes pontos das redes de comunicação. Apesar da maioria desses enlaces serem ópticos, é indispensável a utilização de enlaces via rádio. Com as limitações da disponibilidade de torres e outros espaços para instalação de antenas, vários sistemas de comunicação acabam ocupando espaços restritos, Figura 1.2. Sendo assim, limitar as interferências provocadas pela utilização dos diferentes serviços e maximizar a utilização dos espaços físicos torna-se um desafio ainda maior. Nesse contexto, a utilização de superfícies seletivas em frequência,

frequency selective surfaces, FSS, vem sendo investigada para aumentar a eficiência dos sistemas de comunicação.



Figura 1.2 — Torre com antenas para diversas aplicações.

Em trabalhos recentes desenvolvidos no GTEMA/IFPB, Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, foi proposta uma geometria para FSS baseada nas bonecas russas, matrioska, [4]–[7]. As bonecas matrioska são constituídas por uma série de bonecas colocadas umas dentro das outras, expandindo-se da mais externa (maior) até a mais interna (menor) ocupando apenas o volume da boneca mais externa [7], Figura 1.3.



Figura 1.3 — Exemplos de bonecas matrioska [8].

Na geometria matrioska [6], [7], diferentemente dos anéis concêntricos, os anéis permanecem interligados, formando um único anel, Figura 1.4, aumentando o seu comprimento efetivo e, conseqüentemente, reduzindo a frequência de ressonância. Porém, como apresentada na Figura 1.4, essa geometria é limitada por ser dependente da polarização, o que a torna inconveniente para algumas aplicações.

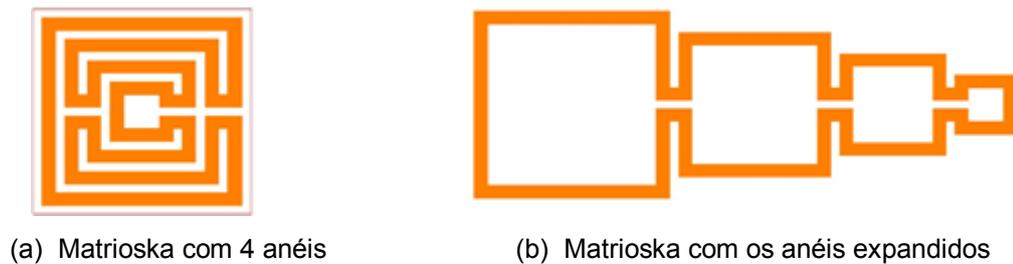


Figura 1.4 — Geometria matrioska [6].

Procurando superar a limitação da dependência da polarização, assim como contribuir para o estudo das FSS baseadas na geometria matrioska, esta dissertação apresenta o desenvolvimento e a caracterização de FSS baseada na geometria matrioska cuja resposta em frequência seja independente da polarização. São propostas as equações iniciais de projeto e apresentadas a caracterização numérica com o uso do software ANSYS Designer, a fabricação e caracterização experimental dos protótipos. Os resultados numéricos obtidos são comparados com os resultados experimentais, observando-se uma boa concordância entre os mesmos.

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2, são apresentados os conceitos básicos sobre FSS, seu comportamento e como são classificadas. Também são descritas as principais técnicas de análise e aplicações.

A descrição do projeto das FSS desta dissertação é realizada no Capítulo 3.

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

As considerações finais e sugestões para trabalhos futuros para continuidade da pesquisa estão no Capítulo 5.

CAPÍTULO 2

2. Superfícies Seletivas em Frequência

As superfícies seletivas em frequência (*frequency selective surface* – FSS) têm sido amplamente utilizadas nos sistemas de comunicação. Dito de forma simples, as FSS consistem em arranjos periódicos de elementos impressos em um substrato dielétrico com uma espessura h e constante dielétrica ϵ_r . Embora também possam ser implementadas em estruturas volumétricas, 3D [9], [10], nesta dissertação serão consideradas apenas as FSS bidimensionais. Essas estruturas apresentam um comportamento similar ao dos filtros, podendo ser do tipo rejeita-faixa ou passa-faixa, dependendo do tipo do preenchimento da célula básica: *patch* ou abertura [11]–[13]. Além do tipo de elemento outros fatores influenciam a resposta em frequência de uma FSS, entre eles: espessura e constante dielétrica do substrato, polarização da onda incidente, dimensões da célula unitária, a geometria utilizada e a periodicidade da estrutura [14], [15], Figura 2.1.

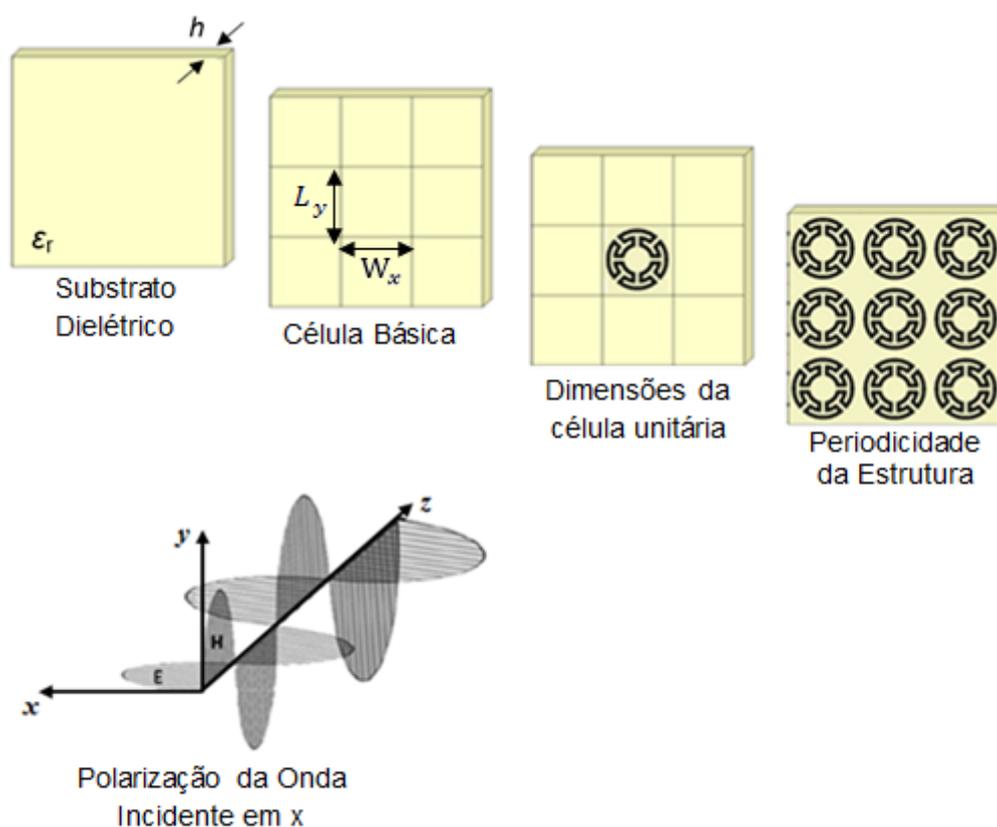


Figura 2.1 — Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS

2.1 Classificações das FSS

Nesta seção são apresentadas algumas das formas de classificar as FSS.

2.1.1 Preenchimento da célula unitária

As FSS podem ser classificadas dependendo da forma como a célula básica é preenchida, podendo ser do tipo *patch* ou abertura.

No primeiro tipo, Figura 2.2 (a), a FSS se comporta como um circuito LC em série, Figura 2.2 (b), com características de um filtro rejeita-faixa, Figura 2.2 (c). Quando uma onda incide perpendicularmente à superfície da FSS, os elementos impressos entram em ressonância e na frequência de ressonância da FSS refletem a onda incidente.

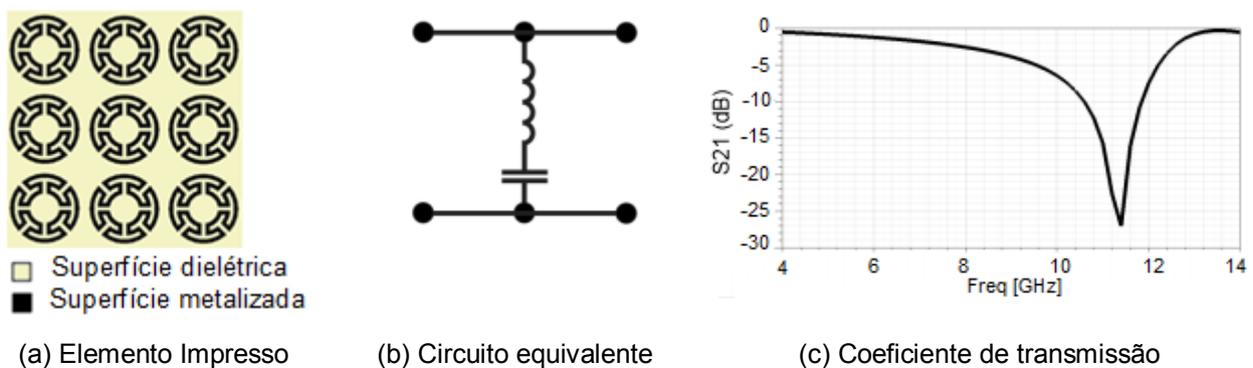


Figura 2.2 — FSS do tipo *patch*.

Já nas estruturas do tipo abertura, Figura 2.3 (a), a FSS se comporta como um circuito LC em paralelo, Figura 2.3 (b), com características de um filtro passa-faixa, Figura 2.3 (c). Nesse caso, quando uma onda incide perpendicularmente à superfície da FSS, na frequência de ressonância os seus elementos se tornam praticamente “transparentes” resultando na transmissão da onda incidente [11], [14].

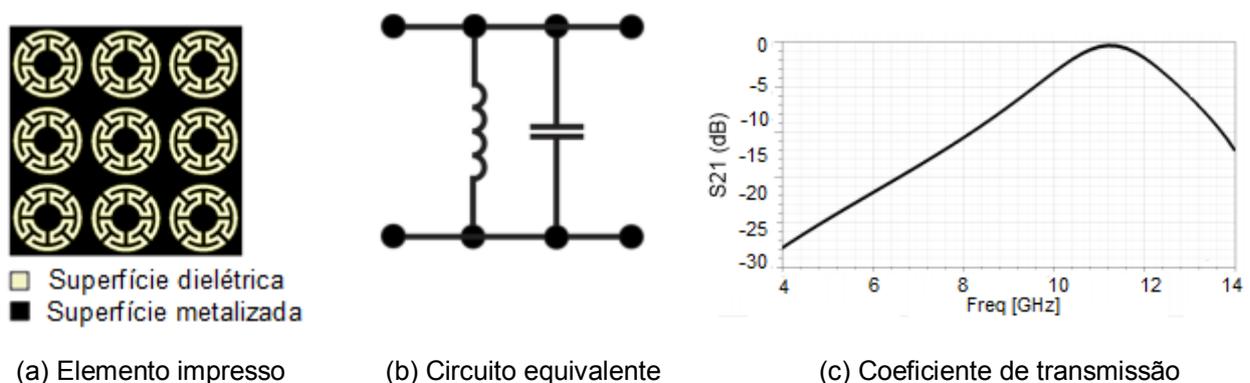


Figura 2.3 — FSS do tipo abertura.

2.1.2 Geometria do elemento da célula

Outra forma de classificação das FSS é através da geometria de seus elementos. A geometria da célula básica é um dos parâmetros que influenciam na resposta em frequência das FSS [14]. Isso torna a geometria utilizada um dos elementos mais ajustáveis no projeto das FSS. Estes elementos podem ser divididos em quatro grupos principais, [11], [14], [15]:

Grupo 1: formado pelos elementos do tipo N-polos conectados pelo centro, Figura 2.4. Exemplos: dipolo fino, dipolo cruzado, tripolo e a cruz de Jerusalém.

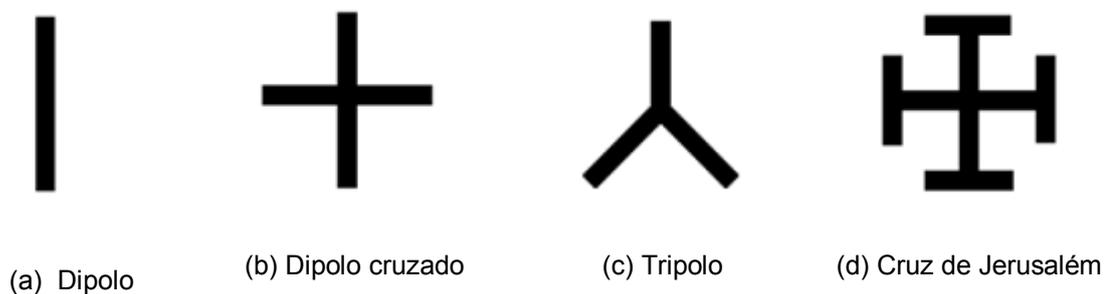


Figura 2.4 — Elementos do grupo 1 [14].

Grupo 2: formado pelos elementos do tipo espiras, Figura 2.5. Exemplos: espira quadrada, espira quadrada dupla, espira quadrada com grade e anéis circulares concêntricos.

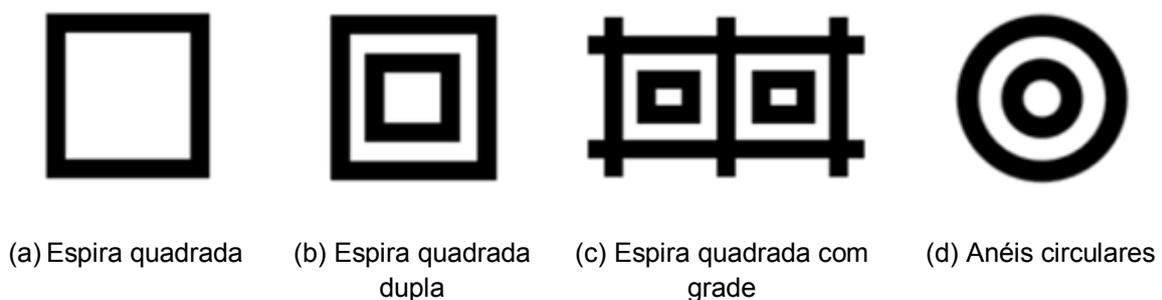


Figura 2.5 — Elementos do grupo 2 [14].

Grupo 3: reúne os elementos de interior sólido, Figura 2.6. Exemplos: *patches* quadrados, retangulares e circulares e outros.



(a) *Patch* quadrado (b) *Patch* retangular (c) *Patch* hexagonal (d) *Patch* circular

Figura 2.6 — Elementos do grupo 3 [14].

Grupo 4: reúne os elementos compostos por elementos formados a partir de combinações de dois ou três elementos pertencentes aos outros grupos, Figura 2.7.



(a) Combinação I (b) Combinação II (c) Combinação III (d) Combinação IV

Figura 2.7 — Elementos do grupo 4 [14].

Existem inúmeras possibilidades quanto à geometria dos elementos das células unitárias, que geram diferentes tipos de comportamento em frequência para uma FSS [4], [16]–[19]. Neste contexto, o GTEMA-IFPB vem realizando estudos, no sentido de identificar geometrias a serem implementadas em FSS. As geometrias matrioska [4]–[7], a estrela de quatro braços [19], em forma de U [20] e fractal [21] são exemplos dessas geometrias investigadas, Figura 2.8. Esses estudos são validados com os resultados obtidos numericamente e experimentalmente.



(a) Matrioska [6]. (b) Estrela de quatro braços [19]. (c) Forma de U [20]. (d) Fractal de Minkowski [21].

Figura 2.8 — Geometrias investigadas no GTEMA-IFPB.

2.1.3 Espessura da camada de metalização

As FSS também podem ser classificadas de acordo com a espessura de sua camada de metalização t , Figura 2.9, 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 para a frequência de ressonância da FSS. As FSS do tipo anteparo fino apresentam a vantagem de serem leves, com pequeno volume e podem ser fabricadas por técnicas de circuito impresso, o que corresponde a um baixo custo [11], [15].

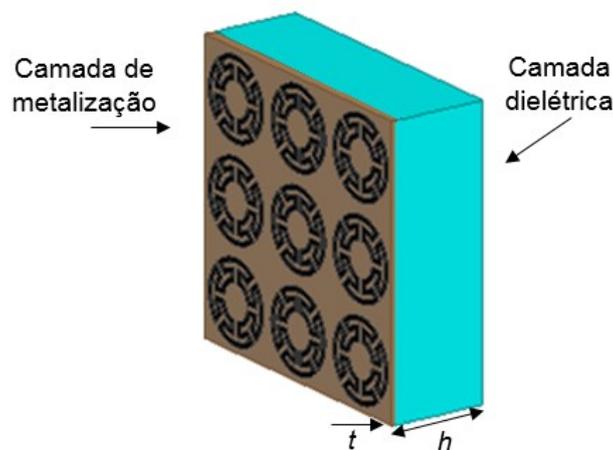


Figura 2.9 — Representação de uma FSS de anteparo fino.

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 2.10. Entre as vantagens das FSS de anteparo espesso, ou de FSS empilhadas com duas ou mais camadas, estão a transição mais rápida da banda passante para a banda de rejeição, *roll-off*, e a banda passante mais plana. No entanto, esse tipo de FSS apresenta como desvantagens: custos mais elevados, peso maior e processo de fabricação mais complexo quando comparado a FSS de anteparo fino [22], [23].

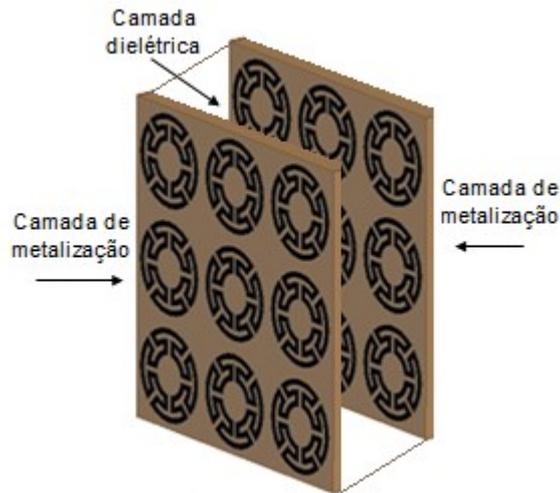
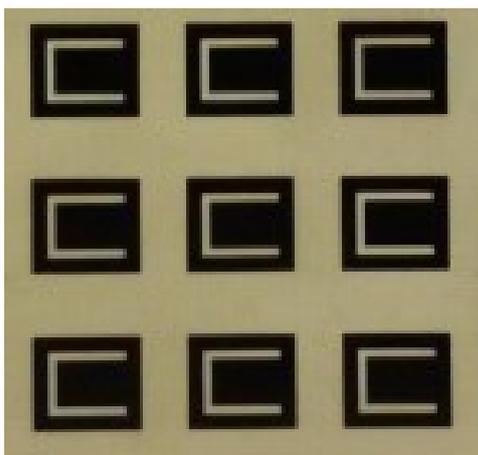


Figura 2.10 — Representação de uma FSS com duas camadas de metalização.

2.1.4 Reconfiguração dos arranjos

As FSS também podem ser classificadas quanto à reconfiguração do seu arranjo, podendo ser passivas, ou simplesmente FSS, e FSS reconfiguráveis, RFSS, Figura 2.11. As FSS passivas apresentam uma resposta em frequência fixa e têm como vantagens as facilidades de projeto e fabricação [24]. Uma das formas de reconfigurar uma FSS é através da incorporação de dispositivos ativos (diodos, varactores, chaves MEMS, etc.), que quando polarizados alteram as características eletromagnéticas da FSS, [25]–[31]. Outra forma de reconfigurar uma FSS é através da mudança da disposição do arranjo mecanicamente [32]–[35].



(a) FSS passiva com geometria em forma de U [20].



(b) FSS reconfigurável com geometria em forma de anéis de dupla polarização [26].

Figura 2.11 — Exemplos de FSS.

2.2 Aplicações de FSS

As FSS podem ser utilizadas nas mais diversas aplicações, ocupando diferentes faixas do espectro eletromagnético. Radomes, absorvedores de micro-ondas, blindagens eletromagnéticas e sistemas sub-refletores de antenas com mais de uma banda de operação, são alguns exemplos de aplicação de FSS [11], [14], [15], [36]–[39]. A seguir são descritas algumas aplicações.

2.2.1 Anteparo da porta do forno de micro-ondas

Uma das aplicações mais populares das FSS, ainda que despercebida, é o anteparo da porta do forno de micro-ondas, Figura 2.12. A FSS atua como um filtro, permitindo a passagem da frequência de luz visível e rejeitando a faixa de frequência de micro-ondas, 2,45 GHz [38].



Figura 2.12 — Aplicação da FSS no forno micro-ondas.

2.2.2 Radomes

As FSS também são aplicadas em radomes, que apresentam características de filtro passa-faixa, Figura 2.13. O sinal na frequência de operação da antena passa através do radome, com o mínimo de perdas, e o mesmo reflete o sinal fora da banda desejada, evitando-se interferências indesejadas [36], [37].

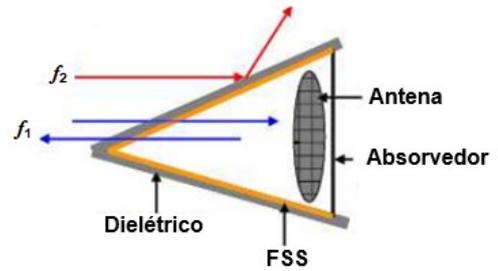
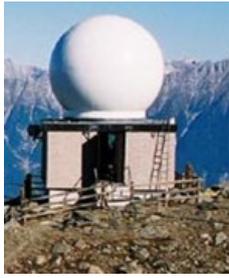


Figura 2.13 — Aplicação da FSS em radomes [39], [40].

2.2.3 Antenas banda dupla com refletor

As FSS podem ser utilizadas para obter maior eficiência de antenas de operação em mais de uma frequência com refletor. A Figura 2.14 apresenta um sistema de antena do tipo *dual band* (banda dupla), onde o alimentador 2 é colocado no ponto focal do refletor principal, enquanto que o alimentador 1 é colocado no ponto focal do sub-refletor. O sub-refletor é formado por uma FSS projetada para refletir a faixa de frequência para o alimentador 1, f_1 , mas é transparente para a faixa de frequência do alimentador 2, f_2 [38], [39], [41].

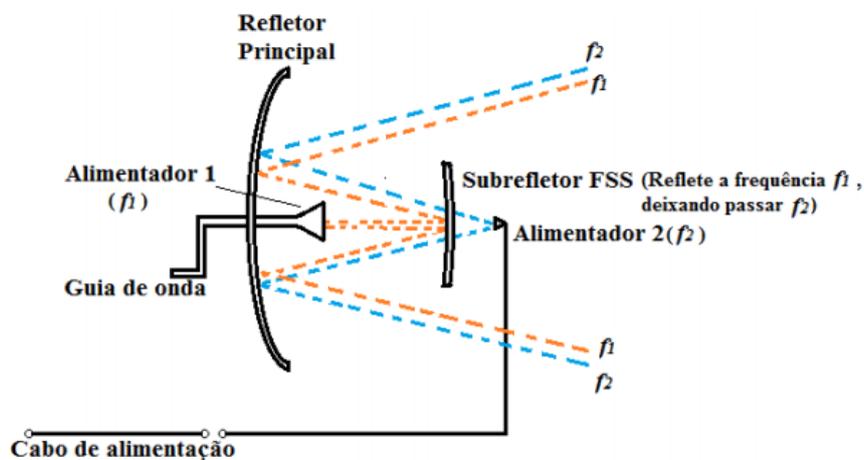


Figura 2.14 — Aplicação de FSS em antena refletora [37].

2.2.4 Janelas eficientes

As FSS também tem sido implementadas em janelas eficientes. A FSS, Figura 2.15, atua como um filtro bloqueando a radiação eletromagnética na região do infravermelho e é transparente na parte visível do espectro e da telefonia celular, impedindo a transferência de calor do ambiente externo para o interno [42]–[45].

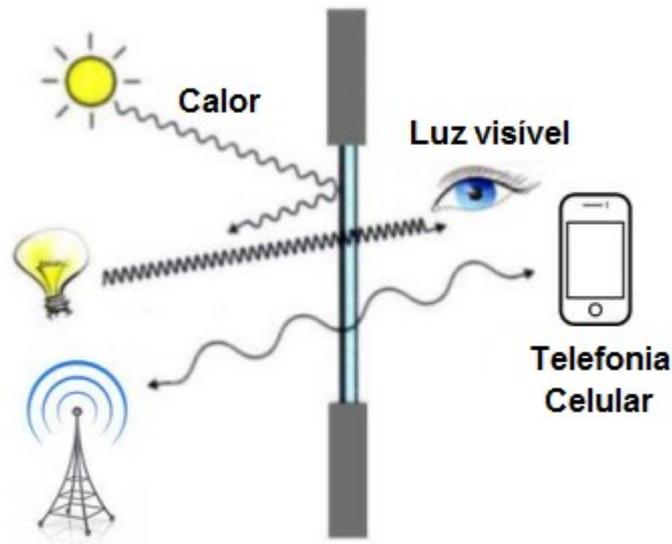


Figura 2.15 — Aplicação de FSS em janelas eficientes [42].

2.2.5 Paredes inteligentes

As FSS vêm sendo utilizadas na implementação de paredes inteligentes como uma das opções para aumentar a eficiência dos sistemas de comunicação sem fio em ambientes *indoor*, assim como limitar a intensidade de sinais eletromagnéticos em ambientes específicos, através da implementação de paredes inteligentes [46]–[51]. As paredes inteligentes, Figura 2.16, podem favorecer o sinal desejado e/ou evitar uma recepção indesejada.

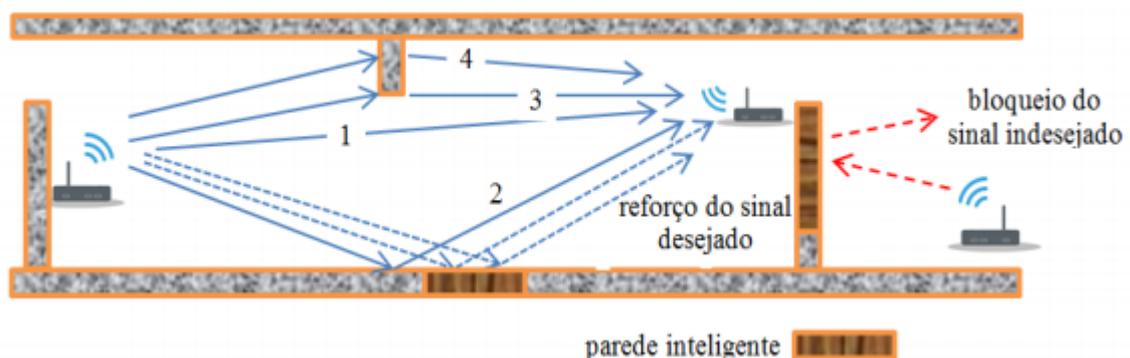


Figura 2.16 — Atuação das paredes inteligentes em ambiente *indoor* [48].

2.3 Técnicas de Análise

Várias técnicas de análise podem ser usadas para obter as características de uma FSS. A primeira etapa a ser realizada é a caracterização numérica, validada

pela caracterização experimental. Nesta seção serão citadas algumas dessas técnicas.

2.3.1 Caracterização numérica

Alguns autores desenvolveram fórmulas aproximadas, para determinar as características de transmissão e de reflexão das FSS tipo *patches* condutores ou aberturas. Com essas fórmulas a FSS é analisada como um circuito LC equivalente, Figura 2.17. No entanto, essas fórmulas são aplicáveis apenas para geometrias mais simples (dipolos e espiras) e, em geral, limitadas à primeira frequência de ressonância [15], [52], [53]. Portanto, para geometrias mais complexas, ou modos de ordem superior, esse método torna-se inviável [54].

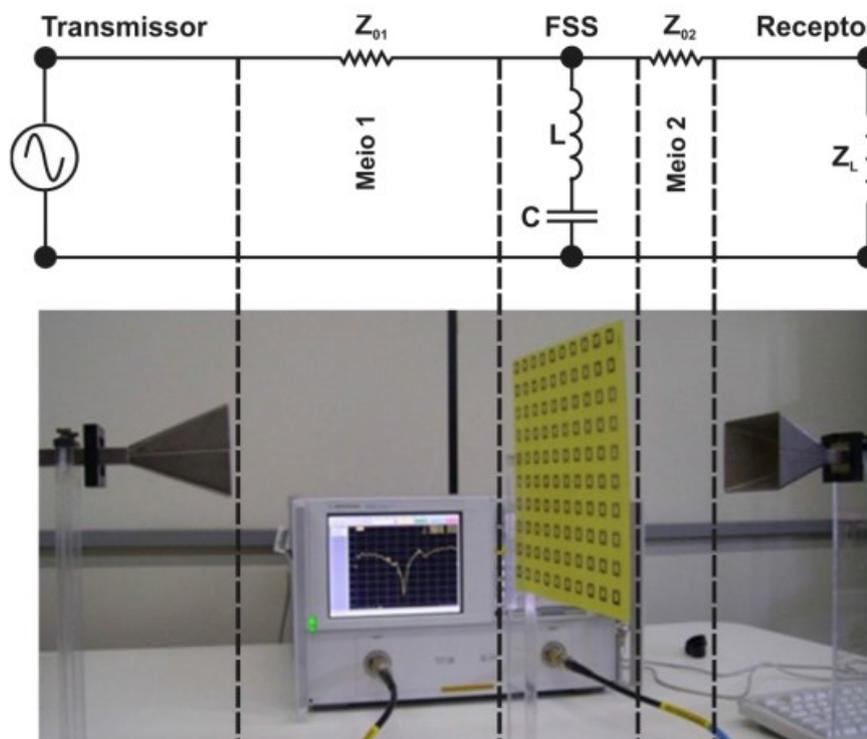


Figura 2.17 — Modelo do circuito equivalente [20].

Com a maior disponibilidade de recursos computacionais, vários métodos numéricos passaram a ser utilizados na caracterização das FSS. Um dos métodos é o das diferenças finitas no domínio do tempo (*Finite-Difference Time-Domain* – FDTD) [55]. Também podem ser utilizados o método dos elementos finitos (*Finite Element Method* – FEM) [55], o método dos momentos (*Method of Moments* – MOM) [56], ou o método iterativo das ondas (*Wave Concept Iterative Procedure* – WCIP) [57].

2.3.2 Caracterização experimental

Após a caracterização numérica, os resultados precisam ser validados com a fabricação e caracterização experimental das FSS. Um dos *setups* de medição mais utilizados é o conjunto formado por duas antenas cornetas e uma FSS entre elas, Figura 2.18. As antenas são conectadas a um analisador de redes e assim o comportamento em frequência da FSS poderá ser determinado. Alterando a polarização das antenas ou rotacionando a FSS, é possível obter as respostas em frequência da FSS para as polarizações x e y, assim como para diferentes ângulos de incidência.

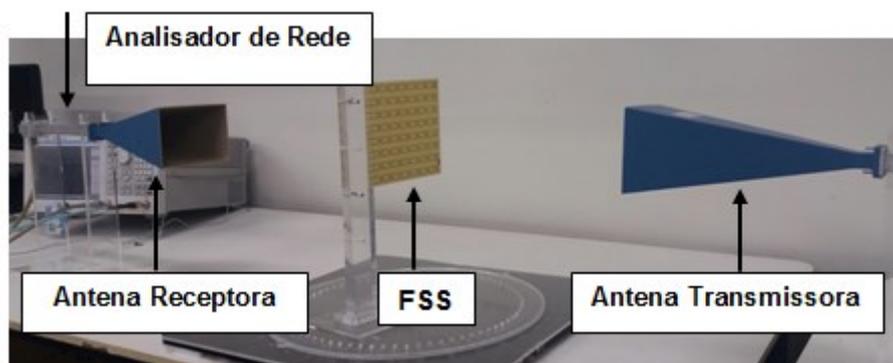


Figura 2.18 — *Setup* de medição para FSS.

Considerando o tamanho da FSS em relação ao comprimento de onda, dados imprecisos podem ser obtidos devido aos efeitos causados pela difração nas bordas das FSS e/ou pela presença de sinais refletidos no ambiente de medição. Alguns artifícios podem ser utilizados para diminuir esses efeitos indesejados. Um desses artifícios é focalizar o feixe de onda no centro da FSS, utilizando lentes em conjunto com as antenas cornetas, [25], [38], [58], Figura 2.19.

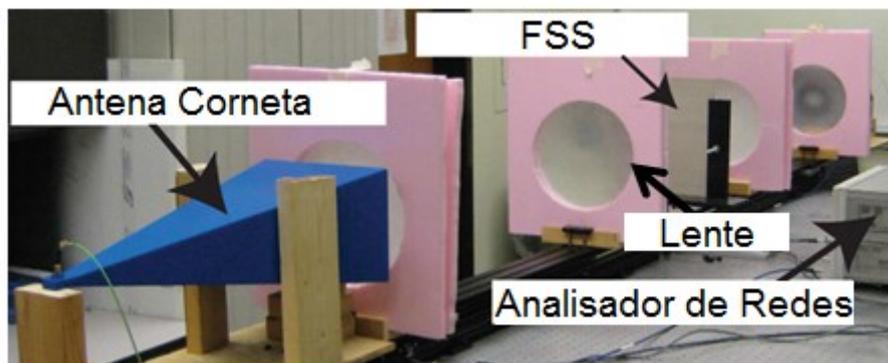


Figura 2.19 — Utilização de lentes no *setup* de medições [44].

Medições mais precisas podem ser realizadas com a utilização de painéis absorvedores, tais como os presentes em câmeras anecóicas, Figura 2.20, que garantem um ambiente praticamente livre de interferências [59].

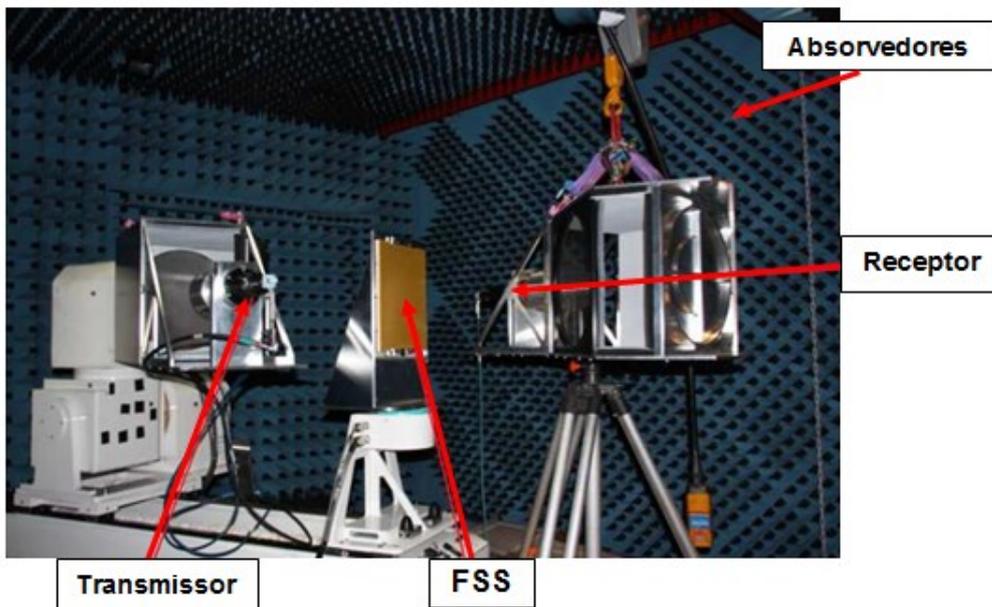


Figura 2.20 — Utilização da câmara anecóica no *setup* de medições [60].

Os absorvedores eliminam as reflexões desnecessárias e evitam os sinais externos que poderiam influenciar a resposta em frequência da FSS. Outra possibilidade é a utilização de uma janela de medição, Figura 2.21, onde uma superfície condutora é limitada por absorvedores. Nessa superfície é deixada uma janela para que nela seja colocada a FSS a ser caracterizada. Este é o *setup* utilizado nas medições realizadas nesta dissertação.

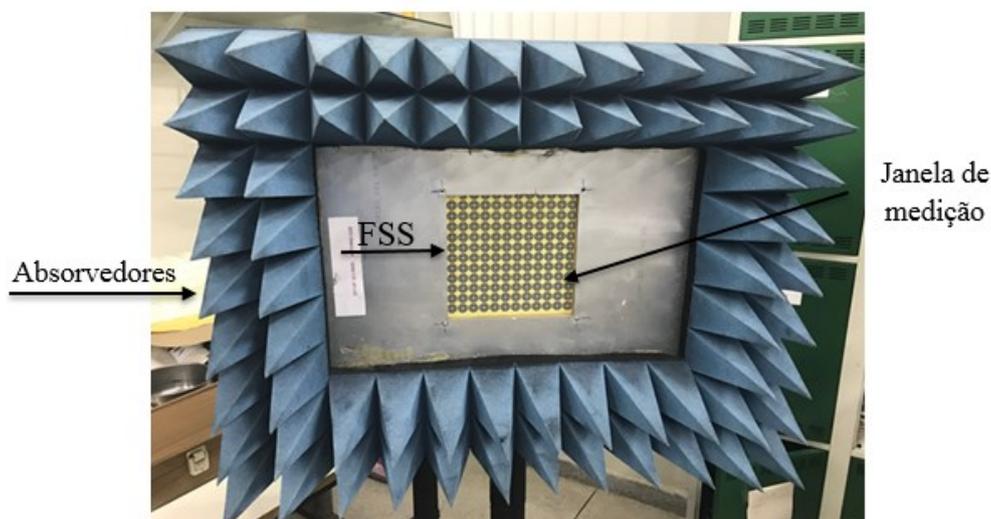


Figura 2.21 — Janela de medição com absorvedores.

Capítulo 3

3. Descrição do Projeto

Neste capítulo é descrito o desenvolvimento do projeto, que teve como objetivo implementar e caracterizar FSS baseadas na geometria matrioska cuja resposta em frequência seja independente de polarização.

3.1 Projeto da FSS

A geometria matrioska considerada neste trabalho é implementada utilizando um substrato de altura h e constante dielétrica ϵ_r . A nova geometria matrioska é composta de anéis circulares concêntricos, com todos os anéis interligados como um único anel, Figura 3.1. Diferentemente da geometria matrioska original, cada anel matrioska é obtido a partir de dois anéis concêntricos.



Figura 3.1 — Célula Básica da geometria matrioska.

O dimensionamento da estrutura, Figura 3.2, é geralmente baseado na experiência do engenheiro de micro-ondas, juntamente com um processo de otimização numérica até se obter as características desejadas. No entanto, expressões para obtenção das dimensões iniciais e estimativa das frequências de ressonância podem auxiliar a alcançar essas características.

A frequência de ressonância do anel externo, simplesmente um anel circular, Figura 3.3, pode ser estimada usando (1):

$$f_{r0}(GHz) = \frac{0,3}{2\pi r_1 \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (1)$$

Sendo:

- r_1 o raio do anel externo;
- ϵ_{ref} é a permissividade elétrica efetiva para um guia de onda coplanar sem plano terra [61] com $s = 10 \times h$, Figura 3.4;
- A largura central igual a largura do anel, w , que pode ser calculada utilizando aplicativos disponíveis como o AppCAD, Figura 3.4 [62], ou outros [63], [64].

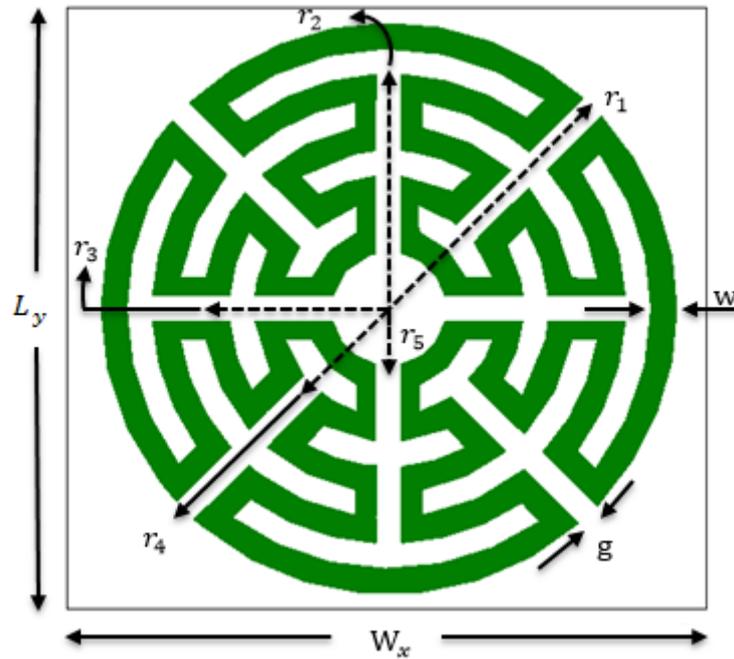


Figura 3.2 — Dimensões da célula básica.

Onde:

- W_x : comprimento da célula unitária ao longo do eixo x;
- L_y : largura da célula unitária ao longo do eixo y;
- r_1 : raio do anel externo;
- r_2 : raio do anel interno;
- r_3 : raio do anel interno;
- r_4 : raio do anel interno;
- r_5 : raio do anel interno;
- w : largura da fita do anel;
- g : largura da abertura.

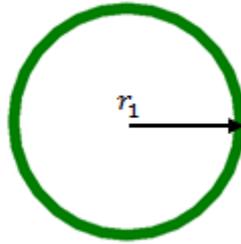


Figura 3.3 — Célula básica anel circular

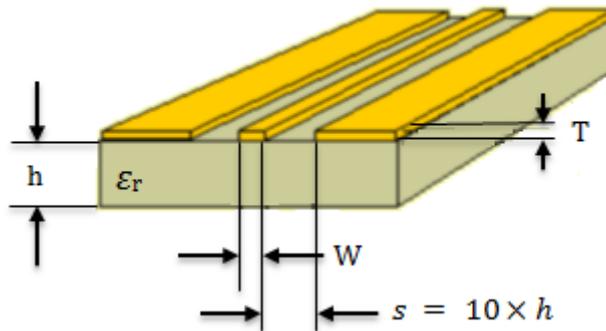


Figura 3.4 — Largura da fita [47].

Com o acréscimo de um anel matrioska, Figura 3.5, a frequência de ressonância pode ser obtida utilizando (2):

$$f_{r1}(GHz) = \frac{0,3}{2\pi(r_1 + r_3)\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (2)$$

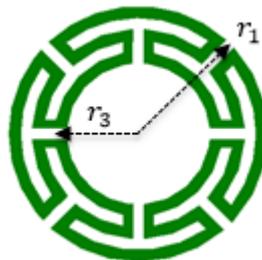


Figura 3.5 — Célula básica um anel matrioska

Se um segundo anel for adicionado, Figura 3.6, a frequência de ressonância pode ser estimada com (3):

$$f_{r2}(GHz) = \frac{0,3}{2\pi(r_1 + r_3 + r_5)\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (3)$$

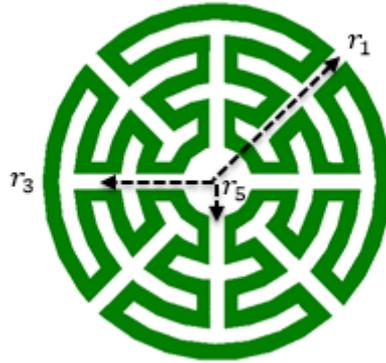


Figura 3.6 — Célula básica dois anéis matrioska

Destaque-se que as equações (1) – (3) são equações iniciais de projeto, sendo uma primeira etapa para um processo de otimização numérica. A largura da fita (w) e do *gap* (g) são determinados considerando as limitações do processo de fabricação.

Todas as FSS foram fabricadas utilizando técnicas de circuito impresso, por meio do procedimento de fixação de adesivos no formato das geometrias propostas e posterior corrosão com percloroato de ferro. Esse procedimento se torna limitado quando as dimensões das estruturas são reduzidas.

Capítulo 4

4. Resultados

Os resultados numéricos foram obtidos com o uso do software ANSYS Designer [64]. Nessa caracterização é considerado o substrato de baixo custo FR-4, com 0,762 mm de espessura, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas de 0,02. Como numericamente não há variação da resposta em frequência com a variação angular da onda incidente, considera-se apenas a incidência perpendicular à FSS. Da mesma forma, como a estrutura é simétrica, apenas a polarização y é considerada.

Na caracterização experimental foram utilizadas duas antenas do tipo *Double Ridge Guide Horn Antenna*, fabricado pela A. H. Systems, modelo SAS-571 (700 MHz a 18 GHz) [65] uma janela de medição e um analisador de redes Agilent E5071C ENA (300 kHz a 20 GHz) [66], Figura 4.1. Para verificar a estabilidade angular da FSS foram consideradas incidências angulares de 15°, 30° e 45° na caracterização experimental.

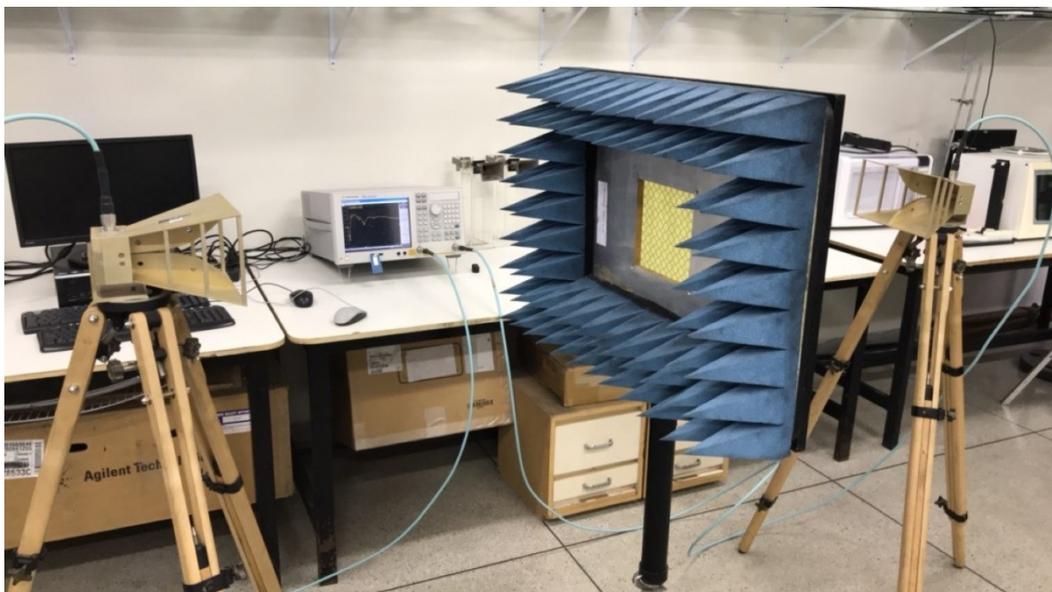
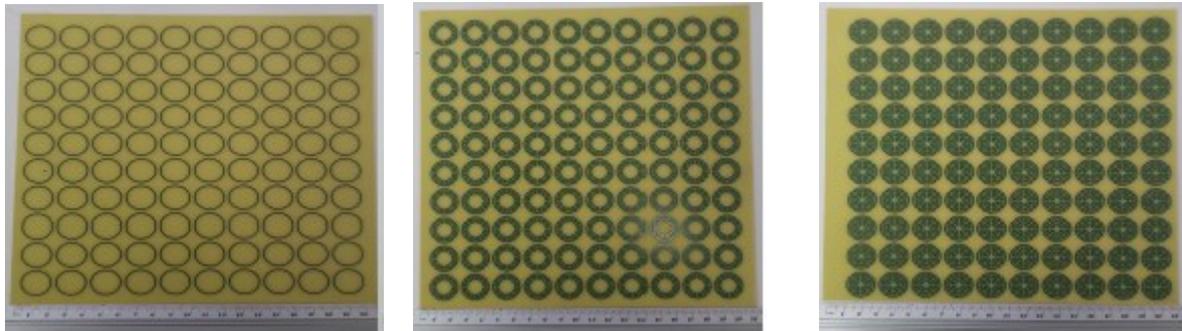


Figura 4.1 — *Setup* de medição utilizado.

Inicialmente foram caracterizadas três FSS, Figuras 4.2, cada uma com 10 × 10 células unitárias, cada célula unitária 20 mm × 20 mm, correspondendo a uma

largura total de 200 mm x 200 mm. Com largura de fita (w) e gap (g) = 0,8 mm. Os resultados obtidos são mostrados a seguir.



(a) FSS1 – anel circular (b) FSS2 – um anel matrioska (c) FSS3 – dois anéis matrioska

Figura 4.2 — FSS fabricadas.

Na figura 4.3, são apresentados os resultados numéricos para as três FSS. Observa-se que com o acréscimo de anéis, ocorre uma redução significativa da frequência de ressonância, comportamento já esperado para a geometria matrioska. Comparando a FSS2 com a FSS1, verifica-se uma redução da frequência de ressonância de aproximadamente 37,9%, de 4,30 GHz para 2,67 GHz. De maneira análoga, comparando a FSS3 com a FSS1 nota-se uma redução de aproximadamente 49% para a primeira frequência de ressonância, de 4,30 GHz para 2,20 GHz. Entretanto, percebe-se que essa redução já não é tão significativa quando comparadas as FSS2 e FSS3. Isto ocorre porque à medida que se aumenta o número de anéis a variação do comprimento efetivo diminui.

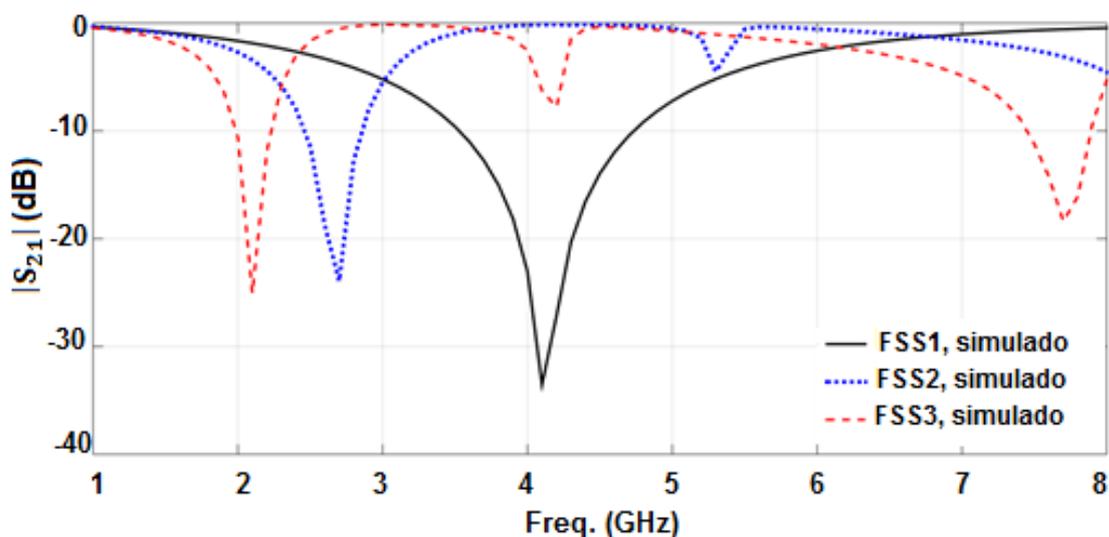


Figura 4.3 — Resposta em frequência, FSS1 comparada com as FSS 2 e 3.

Na figura 4.4, são apresentados os resultados numéricos e experimentais para a FSS1, baseada na geometria anel circular, com raio de 9 mm. Os resultados numéricos e experimentais apresentaram uma boa concordância. Com (1) a frequência de ressonância calculada é de 4,45 GHz, o que quando comparado ao valor medido, 4,22 GHz, representa uma boa concordância para uma abordagem inicial. Como esperado, verifica-se que a resposta em frequência praticamente não é afetada com a variação do ângulo de incidência. A Tabela 4.1 resume os resultados obtidos.

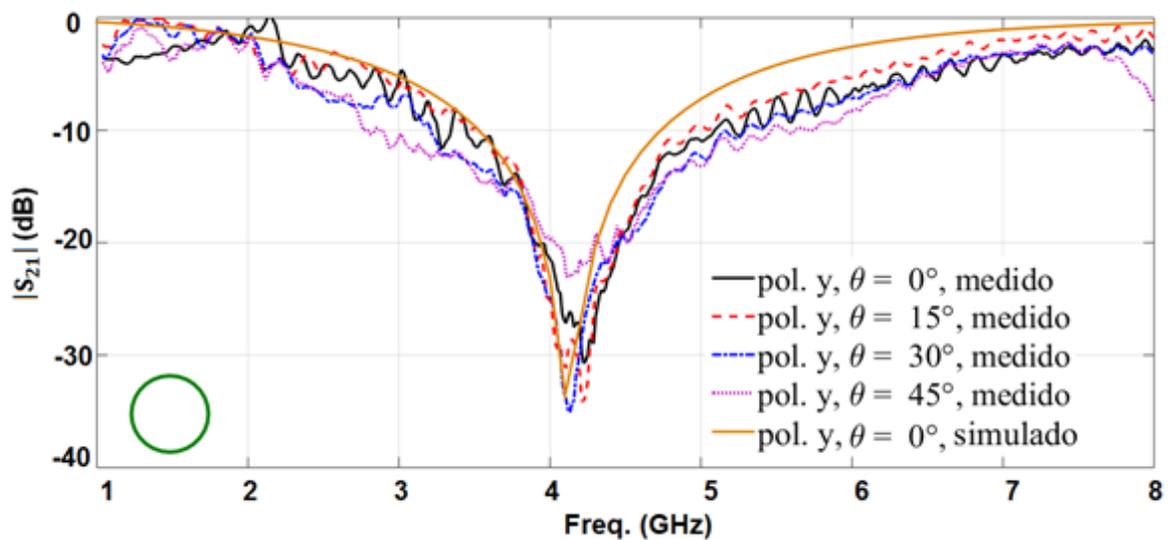


Figura 4.4 — Resposta em frequência, FSS1.

Tabela 4.1. Resultados obtidos para a FSS1

<i>fr</i> simulado (GHz)	4,30
<i>fr</i> medido (GHz)	4,22
<i>fr</i> calculado (GHz)	4,45
DIF (%) simulado/medido	1,86
DIF (%) calculado/medido	5,16
BW simulado (GHz)	1,20
BW medido (GHz)	1,58

Os resultados obtidos para a FSS2 ($r_1 = 9,0$ mm, $r_2 = 7,4$ mm, $r_3 = 5,8$ mm) são apresentados na Figura 4.5. Quando comparada com a FSS 1, é observada

uma redução em torno de 37,9% da frequência de ressonância. Usando (2), a frequência de ressonância é de 2,71 GHz, o que é uma boa aproximação, quando comparada à frequência de ressonância medida 2,83 GHz. Novamente, observa-se que a resposta em frequência praticamente não é afetada pela variação do ângulo de incidência, principalmente para a primeira frequência de ressonância. A Tabela 4.2 resume os resultados obtidos para essa FSS.

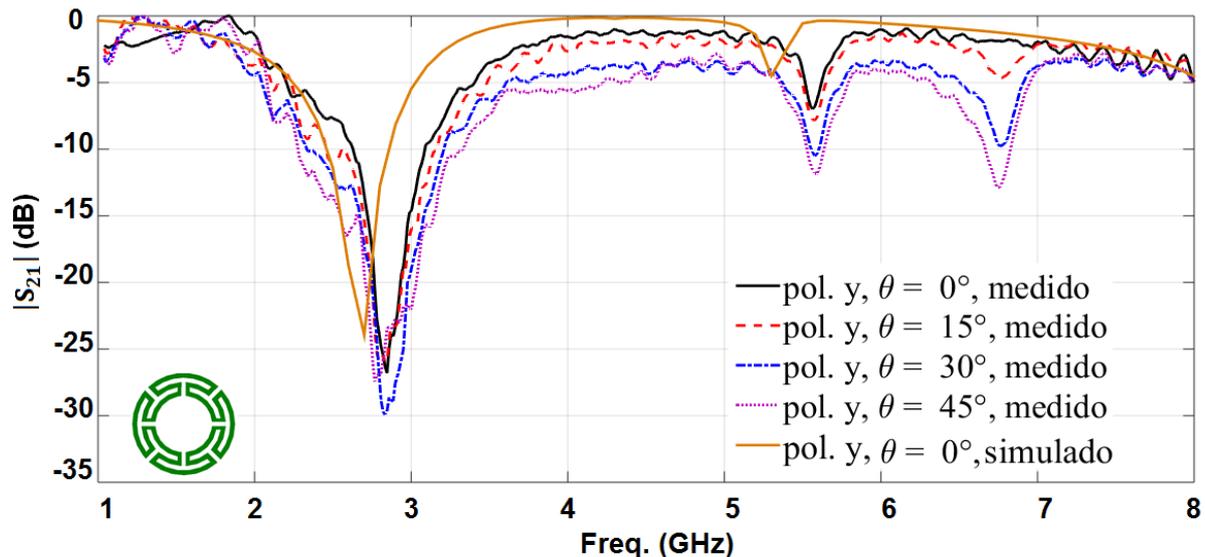


Figura 4.5 — Resposta em frequência, FSS2.

Tabela 4.2. Resultados obtidos para a FSS2

<i>fr</i> simulado (GHz)	2,67
<i>fr</i> medido (GHz)	2,83
<i>fr</i> calculado (GHz)	2,71
DIF (%) simulado/medido	5,65
DIF (%) calculado/medido	4,24
Redução da <i>fr</i> em relação a FSS1	37,9%
BW simulado (GHz)	0,40
BW medido (GHz)	0,45

Na Figura 4.6, os resultados para a FSS3 ($r_1 = 9,0$ mm, $r_2 = 7,4$ mm, $r_3 = 5,8$ mm, $r_4 = 4,2$ mm, $r_5 = 2,6$ mm) são apresentados. A diferença entre as frequências

de ressonância medida (2,38 GHz) e simulada (2,20 GHz), cerca de 7,5%, é devido às limitações do processo de fabricação da FSS. Com (3) a frequência de ressonância é de 2,30 GHz. Quando comparada a estrutura com apenas um anel circular, FSS1, a FSS3 apresentou uma redução de 49% da frequência de ressonância. Verifica-se um comportamento multibanda ao passo que os anéis matrioska são adicionados. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos para essa estrutura.

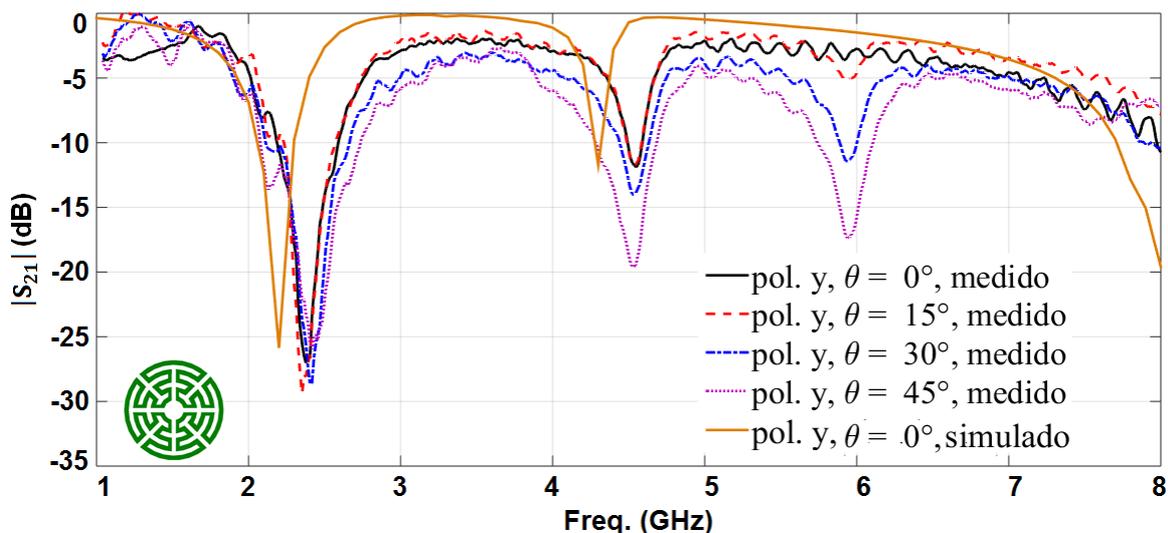


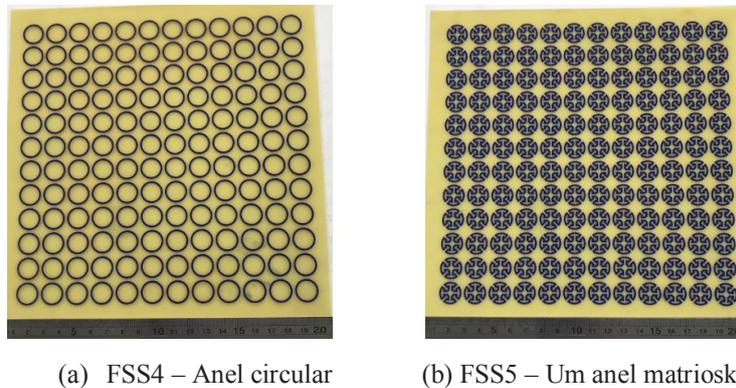
Figura 4.6 — Resposta em frequência, FSS3

Tabela 4.3. Resultados obtidos para a FSS3.

<i>fr</i> simulado (GHz)	2,20
<i>fr</i> medido (GHz)	2,38
<i>fr</i> calculado (GHz)	2,30
DIF (%) simulado/medido	7,5
DIF (%) calculado/medido	3,36
Redução da <i>fr</i> em relação a FSS1	49%
BW simulado (GHz)	0,20
BW medido (GHz)	0,39

Foram fabricadas mais duas FSS, Figura 4.7, caracterizadas, seguindo os mesmos procedimentos adotados na caracterização anterior. Cada uma com 12 × 12 células unitárias, cada célula unitária 16 mm × 16 mm, correspondendo a uma

largura total de 192 mm x 192 mm. Com largura de fita (w) e gap (g) = 1,1 mm. A Figura 4.8 apresenta os resultados numéricos para essas duas FSS. Novamente, verifica-se uma redução significativa da frequência de ressonância, de 5,79 GHz para 3,86 GHz, o que representa uma redução em torno de 33%.



(a) FSS4 – Anel circular (b) FSS5 – Um anel matrioska

Figura 4.7 — FSS fabricadas.

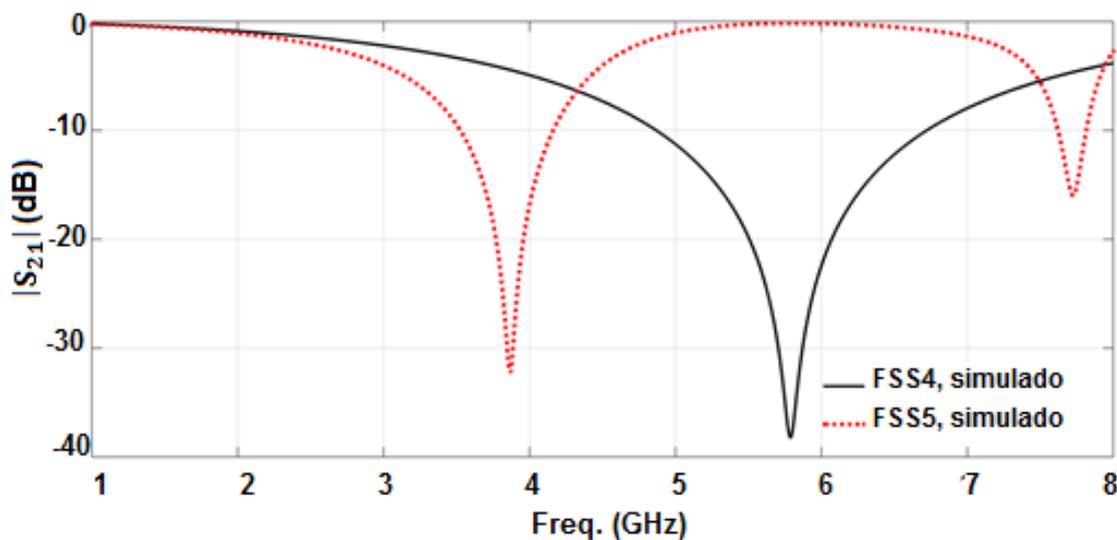


Figura 4.8 — Resposta em frequência, FSS4 comparada com a FSS5.

Na figura 4.9, são apresentados os resultados numéricos e experimentais para a FSS4, baseada na geometria anel circular, com raio de 7 mm. Os resultados numéricos e experimentais apresentaram uma boa concordância. Com (1) a frequência de ressonância calculada é de 5,72 GHz, o que quando comparado ao valor medido, 5,64 GHz, representa uma boa concordância para uma abordagem inicial. Verifica-se que a resposta em frequência praticamente não é afetada variação do ângulo de incidência. A Tabela 4.4 resume os resultados obtidos.

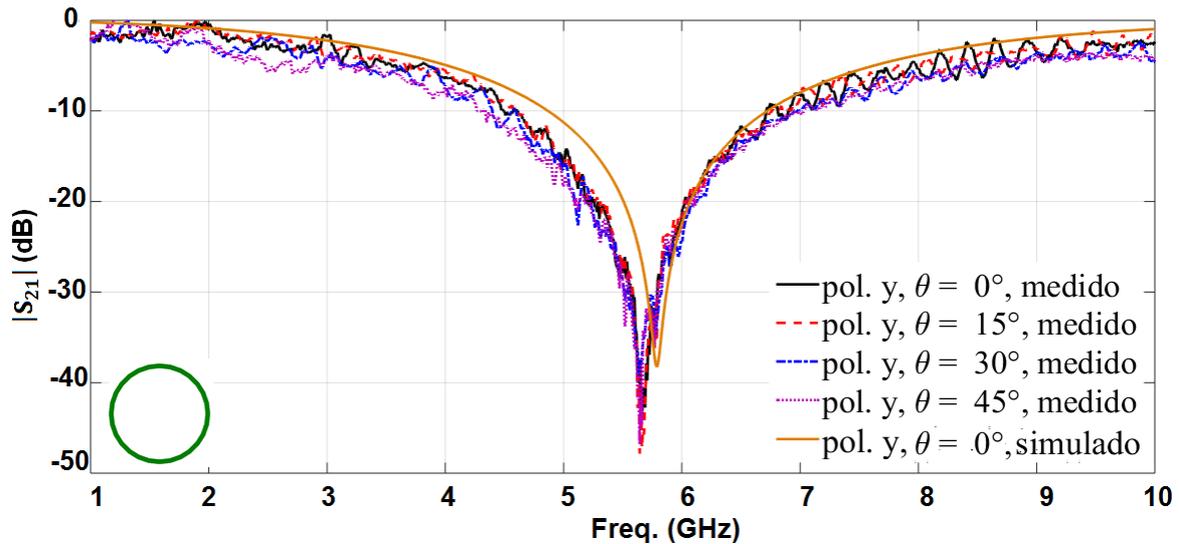


Figura 4.9 — Resposta em frequência, FSS4.

Tabela 4.4. Resultados obtidos para a FSS4

<i>fr</i> simulado (GHz)	5,79
<i>fr</i> medido (GHz)	5,64
<i>fr</i> calculado (GHz)	5,72
DIF (%) simulado/medido	2,59
DIF (%) calculado/medido	1,39
BW simulado (GHz)	1,82
BW medido (GHz)	2,24

Os resultados obtidos para a FSS5 ($r_1 = 7,0$ mm, $r_2 = 5,0$ mm, $r_3 = 2,8$ mm) são apresentados na Figura 4.10. Quando comparada com a FSS 1, é observada uma redução em torno de 33% da frequência de ressonância. Usando (2), a frequência de ressonância é de 4,00 GHz, o que é uma boa aproximação. Observa-se que a resposta em frequência praticamente não é afetada com a variação do ângulo de incidência, principalmente para a primeira frequência de ressonância. A discrepância entre os resultados se deve as limitações do processo de fabricação, para estruturas com dimensões reduzidas. A Tabela 4.5 resume os resultados obtidos para essa FSS.

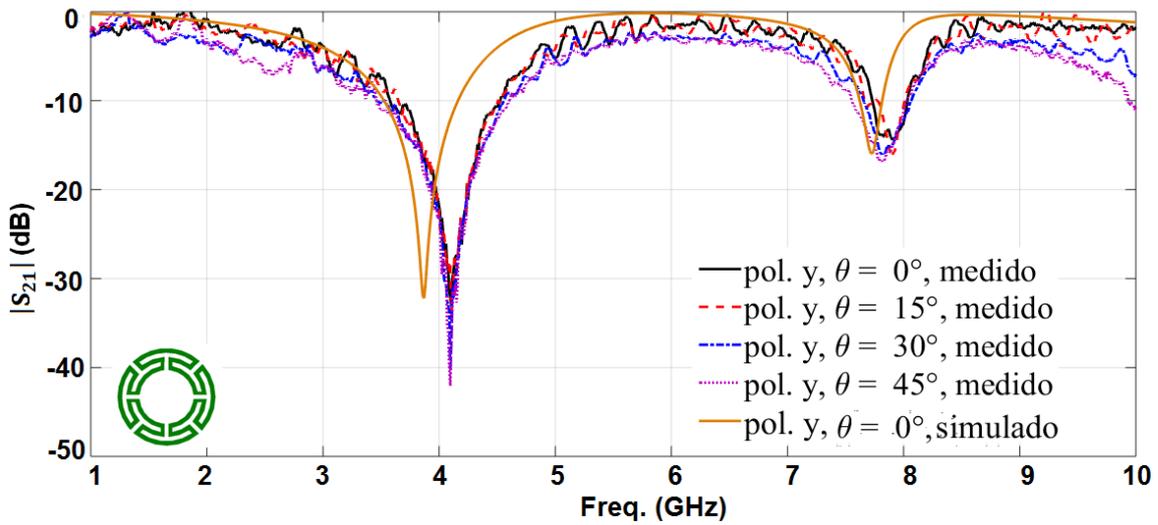


Figura 4.10 — Resposta em frequência, FSS5.

Tabela 4.5. Resultados obtidos para a FSS5

<i>fr</i> simulado (GHz)	3,86
<i>fr</i> medido (GHz)	4,09
<i>fr</i> calculado (GHz)	4,00
DIF (%) simulado/medido	5,95
DIF (%) calculado/medido	2,25
Redução da <i>fr</i> em relação a FSS4	33%
BW simulado (GHz)	0,61
BW medido (GHz)	0,96

Com o objetivo de verificar a influência de cada anel nas frequências de ressonância, é apresentado a seguir uma análise da densidade de corrente nos anéis. A Figura 4.11 ilustra a excitação dos anéis de acordo com a direção do campo elétrico. Como a FSS é independente da polarização, as análises serão feitas considerando apenas a polarização *y*.

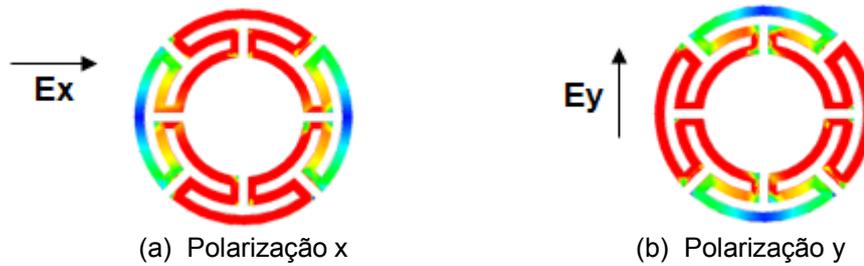
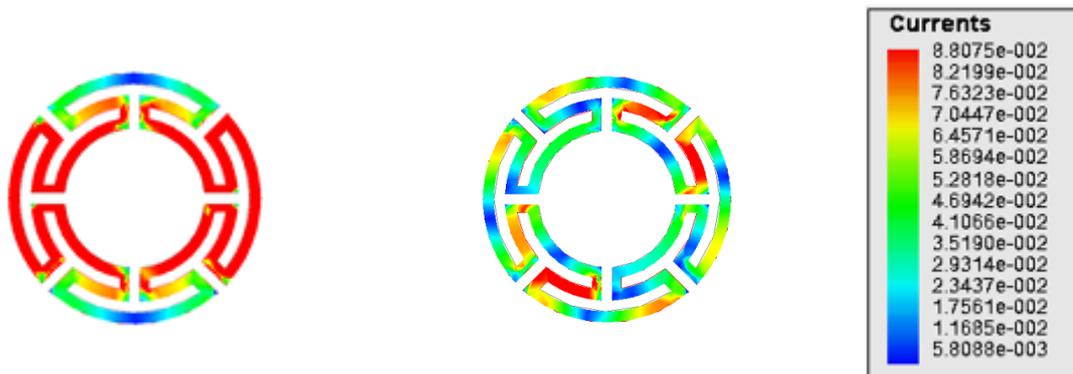


Figura 4.11 — Polarização dos anéis

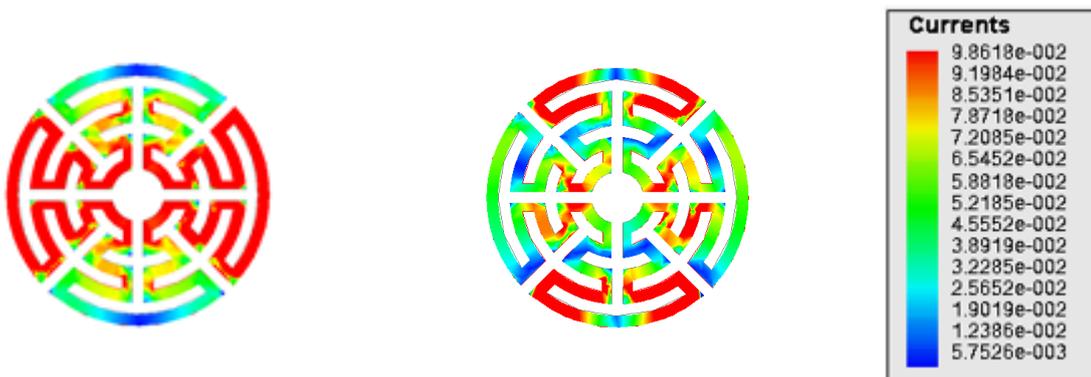
Considerando uma FSS com dois anéis matrioska, Figura 4.12, observa-se que para a primeira ressonância é devida a parte dos anéis paralela à direção do campo elétrico, semelhante a uma simetria par. Para a segunda ressonância observa-se um comportamento semelhante a uma simetria ímpar.



(a) Primeira ressonância, $J_{\text{máx}}$. (b) Segunda ressonância, $J_{\text{máx}}$.

Figura 4.12 — Densidade de corrente elétrica para as duas primeiras ressonâncias, um anel matrioska.

Para a estrutura com dois anéis matrioska, Figura 4.13, verifica-se que tanto para a primeira quanto para a segunda ressonância observa-se um comportamento semelhante a uma simetria par, porém ocorre uma alternância entre os anéis excitados.



(a) Primeira ressonância, $J_{\text{máx}}$.

(b) Segunda ressonância, $J_{\text{máx}}$.

Figura 4.13 — Densidade de corrente elétrica para as duas primeiras ressonâncias, dois anéis matrioska.

A análise da distribuição das correntes nos anéis matrioska é importante, pois permite determinar em que partes da geometria podem ser feitas modificações e assim obter diferentes respostas em frequência.

5. Conclusão

5.1 Considerações finais

Neste trabalho foi desenvolvida e caracterizada uma FSS, baseada na geometria matrioska. Superando uma desvantagem de trabalhos anteriores, a geometria apresentada é independente da polarização.

Inicialmente, foi feito um estudo sobre as superfícies seletivas em frequência, destacando seus conceitos básicos, características e aplicações. A geometria matrioska foi descrita e as equações iniciais de projeto propostas.

Cinco FSS foram projetadas, fabricadas e caracterizadas numericamente e experimentalmente. Os resultados numéricos foram obtidos com o uso do software ANSYS Designer. Na caracterização experimental foi realizada no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do IFPB. Uma boa concordância entre os resultados numéricos e medidos foi observada.

As equações iniciais de projeto, que determinam as dimensões da FSS, foram propostas e apresentaram bons resultados, o que é bom para um projeto inicial, a ser otimizado numericamente.

Verifica-se que além de apresentar a independência da polarização, a geometria matrioska proposta manteve a característica de reduzir a frequência de ressonância. Quando comparado com a geometria do anel circular, uma redução na frequência de ressonância de até 49% foi atingida. A variação do ângulo de incidência considerada na caracterização experimental, de 0° a 45°, confirma a estabilidade da frequência de ressonância, ampliando as possíveis aplicações da geometria matrioska.

A análise da densidade de corrente apresentada revela diferentes comportamentos para as frequências de ressonâncias, seja considerando a ordem da ressonância (primeira, segunda, etc.), seja considerando o número de anéis. Certamente esse é um dos aspectos a ser investigado, para que as considerações apresentadas sejam confirmadas.

5.2 Trabalhos futuros

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

- Investigar o controle da largura de banda para a geometria matrioska;
- Investigar o comportamento de FSS reconfiguráveis utilizando geometria matrioska;
- Dar continuidade a análise da distribuição da densidade de corrente procurando identificar os pontos sensíveis às modificações da geometria;
- Estudar novas geometrias que sejam independentes de polarização e reconfiguráveis.

5.3 Trabalhos publicados

A. Gomes Neto, T. R. de Sousa, J. C. e Silva, D. F. Mamedes, "A Polarization Independent Frequency Selective Surface Based on the Matryoshka Geometry", *2018 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Philadelphia, 2018

D. F. Mamedes, J. P. F. da Silva, J. da S. Souza, T. S. Evangelista, T. R. de Sousa and P. H. F. Silva, "Analysis of impedance matching techniques in tapered microstrip patch antenna," *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aguas de Lindoia, 2017, pp. 1-4. DOI: 10.1109/IMOC.2017.8121034

H. V. H. Silva Filho, C. P. N. Silva, M. R. T. Oliveira, E. M. F. Oliveira, M. T. Melo, T. R. Sousa, A. Gomes Neto, Multiband FSS with Fractal Characteristic Based on Jerusalem Cross Geometry. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 16, p. 932-941, 2017.

H. V. H. Silva Filho, G. G. Machado, M. T. de Melo, T. R. de Souza, A. G. Neto, Low Radar Cross-section and Low Cost Dipole Antenna Reflector. *Advanced Electromagnetics*, v. 6, p. 25, 2017.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Li, K. Lam, X. Li, X. Liu, L. Wang and V. C. M. Leung, "Dynamic spectrum access networks with heterogeneous users: how to price the spectrum?," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 6, pp. 5203-5216, June 2018.
- [2] J. Thomas and P. P. Menon, "A survey on spectrum handoff in cognitive radio networks," *2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, Coimbatore, 2017.
- [3] C. E. C. Bastidas *et al.*, "A standard method for modeling spectrum consumption," *2017 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Piscataway, NJ, 2017.
- [4] A. Gomes Neto, A. G. D'Assunção 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.
- [5] 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.
- [6] J. N. Cruz, **Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta**, dissertação de mestrado, IFPB, João Pessoa, 2015.
- [7] H. P. A. Ferreira, **Matrioska: Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas**, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [8] M. Hurber, "Boneca Matrioska", Disponível em: <http://mauriciohuber.blogspot.com.br/2011/08/Matrioska.html>, consultado em 24/04/2018.
- [9] S. N. Azemi, K. Ghorbani and W. S. T. Rowe, "3D frequency selective surfaces with wideband response," *2014 International Workshop on Antenna Technology:*

Small Antennas, Novel EM Structures and Materials, and Applications (iWAT), Sydney, NSW, 2014.

- [10] Sanz-Izquierdo and E. A. Parker, "3D printed FSS arrays for long wavelength applications," *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, The Hague, 2014.
- [11] A. L. P. de S. Campos, **Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e Projeto**. Editora do IFRN, Natal, 2009.
- [12] Araújo, G. L. R., **Método Híbrido para Projeto de Superfícies Seletivas em Frequência**, Natal, RN, UFRN, Tese de Doutorado, 2015.
- [13] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, A. P. da Costa, J. B. de O. Silva, L. C. M. de Moura and C. Peixeiro, "Band pass FSS with slot four arms star geometry", *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas, 2015, pp. 1-4.
- [14] B. A. Munk, **Frequency-Selective Surfaces: Theory and design**, Wiley, New York, 2000.
- [15] J. C. Vardaxoglou, **Frequency Selective Surfaces – Analysis and Design**, Research Studies Press, England, 1997.
- [16] S. Weile, E. Michielssen and K. Gallivan, "Reduced-order modeling of multiscreen frequency-selective surfaces using Krylov-based rational interpolation," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 5, pp. 801-813, May 2001.
- [17] D. S. Weile and E. Michielssen, "Analysis of frequency selective surfaces through the blazing onset using rational Krylov model-order reduction and Woodbury singularity extraction," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 10, pp. 1470-1478, Oct. 2001.
- [18] G. I. Kiani, **Passive, Active e Absorbing Frequency Selective Surfaces for Wireless Communication Applications**, Sydney, Australia: Macquarie University, Tese de Doutorado, 2009.

- [19] L. C. M. Moura, **Caracterização de FSS com Geometria Estrela de Quatro Braços Tipo Fenda**, Mestrado em Engenharia Elétrica, IFPB, João Pessoa, 2015.
- [20] A. N. da Silva, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de U**, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] G. I. Kiani, **Passive, Active e Absorbing Frequency Selective Surfaces for Wireless Communication Applications**, Sindney, Australia: Macquarie University, Tese de Doutorado, 2009.
- [25] A. P. Costa, **Implementação de uma Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços**, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2016.
- [26] B. Sanz-Izquierdo and E. A. Parker, "Dual polarized reconfigurable frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 2, pp. 764-771, Feb. 2014.
- [27] J. Yuan, S. Liu, X. Kong and H. Yang, "A reconfigurable frequency selective surface for tuning multi-band frequency response separately," *2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation*, Nanjing, 2013, pp. 1288-1290.

- [28] H. Zahra, S. Rafique, M. F. Shafique and K. P. Esselle, "A switchable frequency selective surface based on a modified Jerusalem-cross unit cell," *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisbon, 2015, pp. 1-2.
- [29] A. Edalati and T. A. Denidni, "Frequency selective surfaces for beam-switching applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 1, pp. 195-200, Jan. 2013.
- [30] M. Safari, C. Shafai and L. Safai, "Frequency selective surface implemented using MEM-switched ground plane slots," *2012 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS)*, Maui, HI, 2012, pp. 1-4.
- [31] X. Liang, L. Li, J. A. Bossard and D. H. Werner, "Reconfigurable frequency selective surfaces with silicon switches," *2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Albuquerque, NM, 2006, pp. 189-192.
- [32] F. C. G. da Silva Segundo, **Análise e Projeto de Superfícies Seletivas em Frequência Multibanda e/ou Banda Larga**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRN, Natal, 2014.
- [33] T. K. Chang, R. J. Langley, and E. A. Parker, "Frequency selective surfaces on based ferrite substrates," *IEEE Electronic Letters*, vol. 30, n. 15, pp. 1193-1194, 1994.
- [34] K. ElMahgoub, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni, "Design of novel reconfigurable frequency selective surfaces with two control techniques," *Progress In Electromagnetics Research*, vol.35, pp. 135-145, 2013.
- [35] S. N. Azemi, K. Ghorbani and W. S. T. Rowe, "A reconfigurable FSS using a spring resonator element," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, no., pp. 781-784, 2013.
- [36] S. Narayan, K. Prasad, R. U. Nair, e R. M. Jha, "A novel EM analysis of double-layered thick FSS based on MM-GSM technique for radome applications," *Prog. Electromagn. Res. Lett.*, vol. 28, pp. 53–62, 2012.

- [37] G. I. Kiani, **Passive, Active e Absorbing Frequency Selective Surfaces for Wireless Communication Applications**, Sindney, Australia: Macquarie University, Tese de Doutorado, 2009.
- [38] P. C. Kim, D. G. Lee, I. S. Seo, G. H. Kim, "Low-observable radomes composed of composite sandwich constructions and frequency selective surface," *Compos Sci Technol*, vol. 68, no. 9, pp. 2163-2170, 2008.
- [39] Y. Rahmat-Samii, A. N. Tulintseff, "Diffraction analysis of frequency selective reflector antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 41 (4), 476-487, 1993.
- [40] EESCO Radomes, disponível em https://www2.l3t.com/essco/radomes/ground_based_radomes.htm, consultado em 17/12/2018.
- [41] B. L. D. Bernardes, H.R.D. Filgueiras, E. S. Lima e Arismar Cerqueira S. Jr, "Reforçador de RF Baseado em um Arranjo de Antenas Monopolo com Refletores para Drones," in *Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, MOMAG 2018*, Santa Rita do Sapucaí-MG, Brasil.
- [42] 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.
- [43] L. Subrt, P. Pechac, A. Vallecchi, L. Ford, R. Langley, J. Rigelsford, "Advanced modelling of intelligent walls for indoor smart environments," in *2014 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Hague, Netherlands, April 6–11, 2014, pp. 620–622.
- [44] A. A. Dewani, S. G. O'Keefe, D. V. Thiel and A. Galehdar, "Window RF Shielding Film Using Printed FSS," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 2, pp. 790-796, Feb. 2018.

- [45] G. Kiani, L. Olsson, A. Karlsson and K. Esselle, "Transmission analysis of energy saving glass windows for the purpose of providing FSS solutions at microwave frequencies," *2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, San Diego, CA, 2008
- [46] L. Subrt, P. Pechac, A. Vallecchi, L. Ford, R. Langley, J. Rigelsford, "Advanced modelling of intelligent walls for indoor smart environments," in *2014 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Hague, Netherlands, April 6–11, 2014, pp. 620–622.
- [47] J. Roberts, **Design of a Secure Electromagnetic Building**,: University of Sheffield, Sheffield, England, PhD. Thesis, 2014.
- [48] A. Gomes Neto, J. C. Silva, J. S. Souza, M. O. Alencar, T. S. Evangelista, "Desenvolvimento de uma FSS Banda Dupla para Aplicações em Paredes Inteligentes," in *XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, SBrT 2017, São Paulo, Brasil, setembro, pp. 67–71.
- [49] 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.
- [50] G. I. Kiani, K. L. Ford, L. G. Olsson, K. P. Esselle, and C. J. Panagamuwa, "Switchable frequency selective surface for reconfigurable electromagnetic architecture of buildings," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 2, pp. 581–584, Feb. 2010.
- [51] In-Gon Lee, Ie-Pya Hong, "Frequency selective surface design for blinds applications," in *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Gothenburg, Sweden, April 2013, pp. 2753–2755.
- [52] R. Dubrovka, J. Vazquez, C. Parini and D. Moore, "Equivalent circuit method for analysis and synthesis of frequency selective surfaces," *IEEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 153, no. 3, pp. 213-220, Jun. 2006.

- [53] A. Fallahi, M. Mishrikey, C. Hafner and R. Vahldieck, "Efficient procedures for the optimization of frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 5, pp. 1340-1349, May 2008.
- [54] I. S. S. Lima, **Caracterização de FSS com Motivo em Forma de Estrela de Quatro Braços**, Paraíba: Instituto Federal da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [55] L. E. Vaz, **Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- [56] R. F. Harrington, "The method of moments-a personal review," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next Millennium. 2000 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (C, Salt Lake City, UT, 2000*, pp. 1639-1640 vol.3.
- [57] H. Baudrand, M. Titaouine, N. Raveu, **The Wave Concept in Electromagnetism and Circuits: Theory and Applications**, John Wiley & Sons, USA, 2016.
- [58] D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 38, no. 3, pp. 789-793, Jun. 1989.
- [59] E. F. Harris, "An experimental investigation of the corner-reflector antenna," *Proceedings of the IRE*, vol. 41, no. 5, pp. 645-651, May 1953.
- [60] N. J. P. L. Ramos, **Caracterização de Antena Tipo Refletor de Canto Utilizando Superfícies Seletivas em Frequência**, dissertação de mestrado, IFPB, João Pessoa, 2016.
- [61] R. Simons, **Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems**, USA: Wiley, 2001.
- [62] AppCAD, Disponível em <<http://www.hp.woodshot.com>>, consultado em 22/08/2018.

- [63] CPW. Disponível em <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/calcpw.cfm>, consultado em 22/08/2018.
- [64] ANSYS. Disponível em <http://www.ansys.com>, consultado em 22/08/2018.
- [65] SAS-571 datasheet. Disponível em: http://www.ahsystems.com/datasheets/SAS-571_Horn_Antenna_Datasheet.pdf, consultado em 22/08/2018
- [66] E5071C Analisador de redes datasheet. Disponível em: <http://www.keysight.com/pt/pdx-x202270-pn-E5071C/ena-series-network-analyzer?nid=32496.1150429&cc=BR&lc=por&pm=ov> , consultado em 22/08/2018