



Juliete da Silva Souza

**ANÁLISE DE SUPERFÍCIE SELETIVA EM FREQUÊNCIA
BASEADA NA GEOMETRIA ANÉIS TRAPEZOIDAIS
ABERTOS**

**João Pessoa - PB
Março de 2018**



Juliete da Silva Souza

Análise de Superfície Seletiva em Frequência Baseada na Geometria de Anéis Trapezoidais Abertos

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 Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações
Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Jefferson Costa e Silva, Dr. - IFPB
Orientador
Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Coorientador

João Pessoa – PB, Março de 2018
© Juliete da Silva Souza – julietesouza25@gmail.com

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

S729a Souza, Juliete da Silva.
Análise de superfície seletiva em frequência baseada na geometria anéis trapezoidais abertos / Juliete da Silva Souza. – 2018.
70 f. : il.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.
Orientador: Prof^o Jefferson Costa e Silva.
Coorientador: Prof^o Alfrêdo Gomes Neto.
1. Frequência de ressonância. 2. Superfícies seletivas em frequência. 3. Anéis trapezoidais abertos. 4. Célula unitária. 5. Frequency Selective Surfaces - FSS. I. Título.
CDU 537.635

Ivanise Andrade M. de Almeida
Bibliotecária-Documentalista
CRB-15/0096

JULIETE DA SILVA SOUZA

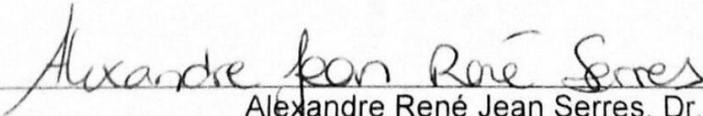
**ANÁLISE DE SUPERFÍCIE SELETIVA EM FREQUÊNCIA
BASEADA NA GEOMETRIA ANÉIS TRAPEZOIDAIS
ABERTOS**

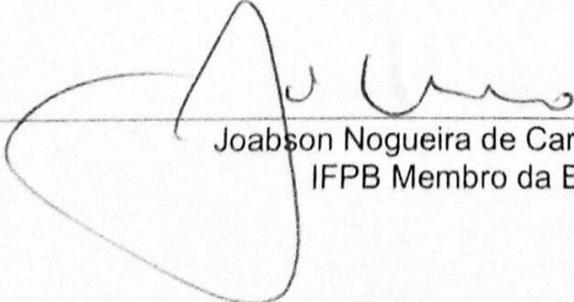
Dissertação aprovada pela Banca Examinadora em: 02/03/2018.

BANCA EXAMINADORA


Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Orientador


Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Coorientador


Alexandre René Jean Serres, Dr. –
UFCG Membro da Banca


Joabson Nogueira de Carvalho, Dr. –
IFPB Membro da Banca

João Pessoa – PB, Março de 2018
© Juliete da Silva Souza – julietesouza25@gmail.com

A Deus.

Aos meus pais, Sônia Maria Silva de
Souza e Joacir Gomes de Souza.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, por me ter dado coragem, força, discernimento e determinação para enfrentar todos os momentos de desânimo e me guiar até o final desta etapa.

Aos meus pais, pelo o apoio e confiança me dado neste período longe de casa, pelos conselhos e por sempre acreditarem que sou capaz de almejar todos meus sonhos.

Agradeço aos meus irmãos, Janiere, Joacir Filho e Daniel pelo o apoio.

Aos meus avós paternos, Maria Gomes e Sebastião Duarte pelo incentivo e carinho.

Aos meus avós maternos, Maria Irene e Joaquim Severo (*in memorian*) pelo amor e carinho que sempre demonstraram por mim.

A minha bisavó Luiza (*in memorian*) pelo afeto e apoio que sempre estarão guardados no meu coração.

Ao Instituto Federal do Ceará-Campus Cedro, por ter sido primordial na minha formação acadêmica e por ter me proporcionado experiências maravilhosas que me moldaram para enfrentar os desafios da vida, incluindo esse período do mestrado no Instituto Federal da Paraíba, onde tive que aprender a enfrentar situação fora da realidade de uma cidade do interior do Ceará e lutar a cada dia para acompanhar os ensinamentos repassados durante todo esse período que me fortaleceram e me proporcionaram maravilhosas experiências, bem como, pelo apoio financeiro ofertado pelo IFPB – Campus João Pessoa onde fui bolsista durante o mestrado.

Aos professores Alfredo e Jefferson, por terem acreditado no meu potencial em busca de realizar da melhor forma meu trabalho durante esta etapa acadêmica.

A todos os professores pelos conhecimentos repassados durante todo o mestrado.

Aos amigos que contribuíram direta e indiretamente neste período, em especial a Laís, Xavier, Gilliane, Natália, José Tavares, Sheysa, Thaís e Ítalo por sempre me incentivarem com palavras de positividade.

Aos amigos que conquistei neste período do mestrado que passei em João Pessoa.

A todos meus familiares que me apoiaram nesta fase da minha vida.

A todos, muito obrigada!

“Não se mede o valor de um homem pelas suas roupas ou pelos bens que possui, o verdadeiro valor do homem é o seu caráter, suas ideias e a nobreza dos seus ideais.”

Charles Chaplin

“Somos o que fazemos, mas somos, principalmente, o que fazemos para mudar o que somos.”

Eduardo Galeano

RESUMO

Os serviços de comunicações móveis têm crescido consideravelmente nos últimos anos, e as aplicações voltadas para *smartphones* e *tablets* (TV digital, geolocalização, serviços de internet, entre outros) estão se tornando cada vez mais populares. Além dessas aplicações para *drones* (veículo não tripulados) também vêm se popularizando. Tais serviços, demandam redes de alta capacidade, com requisitos específicos de operação, como faixa de frequência e níveis de potência. É neste contexto que as superfícies seletivas em frequência, FSS (do inglês *Frequency Selective Surfaces*) têm se destacado em diversas aplicações na área de telecomunicações. Essas estruturas apresentam uma resposta em frequência dependente da geometria da célula unitária, do tipo de elemento, das características do dielétrico (como por exemplo, a constante dielétrica, altura e a tangente de perdas), da periodicidade do arranjo e da polarização da onda incidente. No GTEMA-IFPB (Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado do IFPB) têm sido realizados estudos voltados ao desenvolvimento de novas geometrias para o elemento básico da FSS, dentre os quais podem ser citados: estrela de quatro braços, matrioska, geometria em forma de U, anéis trapezoidais, entre outros. Dando prosseguimento aos estudos de novas geometrias para células unitárias de FSS realizados pelo GTEMA-IFPB, este trabalho tem como objetivo verificar o funcionamento e estabelecer as regras de projetos para uma FSS baseada na geometria anéis trapezoidais abertos. São propostas as equações iniciais de projeto e apresentados os resultados numéricos, obtidos por meio de simulação utilizando o *software* ANSYS Designer, sendo esses comparados com resultados experimentais, observando-se uma boa concordância entre os mesmos. A geometria proposta é flexível no ajuste da resposta em frequências devido a excitação dos anéis em pares, o que permite o ajuste, de forma quase independente, das respectivas frequências de ressonância, sendo potencialmente atrativa para aplicações com FSS reconfiguráveis e paredes inteligentes.

Palavras-chave: anéis trapezoidais abertos, célula unitária, frequência de ressonância, FSS, simulação.

ABSTRACT

Mobile communications services have grown considerably in recent years, and the applications focused on smartphones and tablets (digital TV, geolocation, internet services, among others) are becoming increasingly popular. In addition to these, applications for drones (unmanned vehicles) have also become popular. These services require high capacity networks, with specific frequency range and power levels. It is in this context that Frequency Selective Surfaces (FSS) have excelled themselves in several applications in the telecommunications area. These structures have a frequency response dependent on unit cell geometry, element type, characteristics of the dielectric (such as dielectric constant, height and loss tangent), the periodicity of the arrangement and the polarization of the incident wave. At the GTEMA-IFPB (Applied Telecommunications and Electromagnetism Group, IFPB) researches are realized to development of new geometries for the basic element of the FSS, among which can be cited: four-armed star, matrioska, U-shaped geometry, trapezoidal ring, etc. Continuing the studies of new geometries for FSS unit cells performed by GTEMA – IFPB, this work aims to verify the behaviour and establish the design procedures for an FSS based on geometry open trapezoidal rings. The initial design equations are proposed and numerical results, obtained by simulation with ANSYS Designer software, are presented, being these compared with experimental results, observing a good agreement between them. The proposed geometry is flexible in adjusting the frequency response due to the excitation of the rings in pairs, allowing to adjust almost independently the respective resonance frequencies, being potentially attractive for applications with reconfigurable FSS and smart walls.

Key words: open trapezoidal rings, unit cell, resonance frequency, FSS, simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Sistemas de comunicação multifrequenciais	18
Figura 1-2 - Geometrias desenvolvidas no GTEMA-IFPB	18
Figura 2-1 - Geometria básica de uma FSS	23
Figura 2-2 - Parâmetros que influenciam na resposta em frequência da FSS.....	23
Figura 2-3 - FSS com elementos do tipo <i>patch</i> condutor	24
Figura 2-4 - FSS com elementos do tipo abertura ou <i>slot</i>	24
Figura 2-5 - Grupo 1 n-polos conectados pelo centro	25
Figura 2-6 - Grupo 2 elementos tipo espiras	26
Figura 2-7 - Grupo 3 elementos de interior sólido	26
Figura 2-8 - Grupo 4 elementos tipo combinações	26
Figura 2-9 - Elementos tipo fractais.....	27
Figura 2-10 - Elementos simples e seus equivalentes convolucionados	27
Figura 2-11 - FSS do tipo espessa de duas camadas	28
Figura 2-12 - Arranjos periódicos: (a) FSS passiva (b) FSS reconfigurável	29
Figura 2-13 - Aplicação de FSS como anteparo na porta do forno de micro-ondas	30
Figura 2-14 - Exemplo de aplicação de radomes	30
Figura 2-15 - Aplicação de FSS em janela eficiente	31
Figura 2-16 - Atuação das paredes inteligentes para melhoria do sistema de comunicação sem fio em ambiente <i>indoor</i>	32
Figura 2-17 - Circuito equivalente, <i>setup</i> de medição.....	33
Figura 2-18 - <i>Setup</i> de medição para FSS	34
Figura 2-19 - Esquema de um <i>setup</i> de medições de FSS com lentes	35
Figura 2-20 - Esquema de medição da FSS com câmara anecóica	36
Figura 3-1 - Geometria anéis trapezoidais abertos: (a) Célula unitária (b) Parâmetros usados para dimensionamento dos anéis externos e internos	38

Figura 3-2 - Polarização dos anéis trapezoidais: (a) Polarização x (b) Polarização y	39
Figura 3-3 - Densidade de corrente elétrica para as duas primeiras frequências de ressonância e polarização: (a) Primeira ressonância, $J_{\text{máx.}} 0,10 \text{ A/m}^2$ (b) Segunda ressonância $J_{\text{máx.}} 0,10 \text{ A/m}^2$	39
Figura 3-4 - Guia de ondas coplanar sem plano terra	40
Figura 4-1 - <i>Setup</i> de medições	42
Figura 4-2 - Célula unitária da FSS: (a) FSS01 (b) FSS02 (c) FSS03 (d) FSS04	43
Figura 4-3 - FSS fabricadas: (a) FSS01 (b) FSS02 (c) FSS03 (d) FSS04	43
Figura 4-4 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), FSS01, pol. y...	45
Figura 4-5 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), FSS02, pol. y...	46
Figura 4-6 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), FSS03, pol. y	46
Figura 4-7 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), FSS04, pol. x	47
Figura 4-8 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), FSS04, pol. y	48
Figura 4-9 - Resultados experimentais FSS01 variação angular de 0° a 30° : (a) pol. x, variação angular de 0° a 30° , medido (b) pol. y, variação angular de 0° a 30° , medido	50
Figura 4-10 - Resultados numéricos FSS01 variação angular de 0° a 30° : (a) pol. x, variação angular de 0° a 30° , simulado (b) pol. y, variação angular de 0° a 30° , simulado.....	51
Figura 4-11 - Comparação dos resultados simulados e medidos da FSS01, variação angular de 0° e 30° para as polarizações x e y: (a) resultados pol. x simulado e medido, variação angular de 0° e 30° (b) resultados pol. y simulado e medido, variação angular de 0° e 30°	52

Figura 4-12 - Resultados experimentais FSS02 variação angular de 0° a 30°: (a) pol. x, variação angular de 0° a 30°, medido (b) pol. y, variação angular de 0° a 30°, medido	53
Figura 4-13 - Resultados numéricos FSS02 variação angular de 0° a 30°: (a) pol. x, variação angular de 0° a 30°, simulado (b) pol. y, variação angular de 0° a 30°, simulado	54
Figura 4-14 - Comparação dos resultados simulados e medidos da FSS02, variação angular de 0° e 30° para as polarizações x e y: (a) resultados pol. x simulado e medido, variação angular de 0° e 30° (b) resultados pol. y simulado e medido, variação angular de 0° e 30°	55
Figura 4-15 - Resultados experimentais FSS03 variação angular de 0° a 30°: (a) pol. x, variação angular de 0° a 30°, medido (b) pol. y, variação angular de 0° a 30°, medido	56
Figura 4-16 - Resultados numéricos FSS03 variação angular de 0° a 30°: (a) pol. x, variação angular de 0° a 30°, simulado (b) pol. y, variação angular de 0° a 30°, simulado	57
Figura 4-17 - Comparação dos resultados simulados e medidos da FSS03, variação angular de 0° e 30° para as polarizações x e y: (a) resultados pol. x simulado e medido, variação angular de 0° e 30° (b) resultados pol. y simulado e medido, variação angular de 0° e 30°	58
Figura 4-18 - Resultados experimentais FSS04 variação angular de 0° a 30°: (a) pol. x, variação angular de 0° a 30°, medido (b) pol. y, variação angular de 0° a 30°, medido	59
Figura 4-19 - Resultados numéricos FSS04 variação angular de 0° a 30°: (a) pol. x, variação angular de 0° a 30°, simulado (b) pol. y, variação angular de 0° a 30°, simulado	60
Figura 4-20 - Comparação dos resultados simulados e medidos da FSS04, variação angular de 0° e 30° para as polarizações x e y: (a) resultados pol. x simulado e medido, variação angular de 0° e 30° (b) resultados pol. y simulado e medido, variação angular de 0° e 30°	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões das FSS.....	44
Tabela 2 - Frequências ressonantes - FSS01, FSS02, FSS03 E FSS04.....	48

LISTA DE SIGLAS

FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i> (Diferença Finita no Domínio do Tempo)
FEM	<i>Finite-Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
FSS	<i>Frequency Selective Surfaces</i> (Superfície Seletiva em Frequência)
GHz	Gigahertz
GTEMA- IFPB	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado-IFPB
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
MoM	<i>Method of Moments</i> (Método dos Momentos)
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> (Identificação por Rádio Frequência)
THz	Terahertz
WCIP	<i>Wave Concept Iterative Procedure</i> (Método Iterativo das Ondas)

LISTA DE SIMBOLOS

b_{1e}	Largura da base maior do trapézio, lado externo
b_{1i}	Largura da base maior do trapézio, lado interno
b_{2e}	Largura da base menor do trapézio, lado externo
b_{2i}	Largura da base menor do trapézio, lado interno
ϵ_{ref}	Constante dielétrica efetiva
E_x	Polarização x
E_y	Polarização y
f_{r1}	Primeira frequência de ressonância
f_{r2}	Segunda frequência de ressonância
g	Largura da abertura
h_e	Altura externa do anel
h_i	Altura interna do anel
l_{1ef}	Comprimento médio do anel trapezoidal aberto cuja base menor é paralela do campo elétrico
l_{2ef}	Comprimento médio do anel trapezoidal aberto cuja maior base é perpendicular à direção do campo elétrico
p_{ext}	Perímetro externo
p_{int}	Perímetro interno
S_{x1}	localização inicial da base maior do trapézio ao longo do eixo x
S_{y1}	localização inicial da base maior do trapézio ao longo do eixo y
$ S_{21} $	Módulo de coeficiente de transmissão
W	largura da fita do anel
W_x	largura da célula unitária ao longo do eixo x
W_y	largura da célula unitária ao longo do eixo y

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa	19
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 Organização do trabalho	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 Superfícies seletivas em frequência	22
2.2 Classificação das FSS	23
2.2.1 Classificação das FSS quanto ao preenchimento da célula unitária	24
2.2.2 Classificação das FSS quanto à geometria do elemento da célula unitária	25
2.2.3 Classificação das FSS quanto à espessura	27
2.2.4 Classificação das FSS quanto à excitação dos arranjos.....	29
2.3 Aplicações de FSS	29
2.3.1 Anteparo da porta de forno de micro-ondas	30
2.3.2 Radomes	30
2.3.3 Janelas eficientes	31
2.3.4 Paredes inteligentes	31
2.4 Técnicas de análise	32
2.4.1 Caracterização numérica	32
2.4.2 Caracterização experimental	34
3 GEOMETRIA ANÉIS TRAPEZOIDAIS ABERTOS	37
3.1 Descrição do projeto.....	37
4 RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS	42

5 CONCLUSÃO	62
5.1 TRABALHOS FUTUROS	62
TRABALHOS PUBLICADOS	63
REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de prover acesso aos serviços de telecomunicações, assim como superar as grandes distâncias e tornar mais rápido e eficaz o processo de envio e recebimento de informações têm impulsionado a evolução tecnológica na área de telecomunicações [1]-[4].

Os padrões IEEE 802.11 (padrões de transmissão e codificação para redes de comunicações sem fio), e o IEEE 802.16 (camada física para sistemas de redes sem fio metropolitanas operando na faixa de frequência de 2 e 66 GHz) [5] surgiram em decorrência da necessidade de transmissão de grandes quantidades de dados a longas distâncias, tais como, símbolos, caracteres, textos, sons, imagens, vídeos dentre outros, em sistemas com ou sem fio [6].

Os serviços de comunicações móveis têm crescido consideravelmente nos últimos anos. Embora esse crescimento seja principalmente de aplicações voltadas para *smartphones e tablets* (TV digital, geolocalização, serviços de internet etc.), as aplicações para *drones* (veículos não tripulados) estão se tornando cada vez mais populares [7], [8]. Tais serviços demandam redes de alta capacidade com requisitos de operação, como por exemplo, faixa de frequência de operação, níveis de potência específicos, maior nível de segurança, elevadas taxas de transmissão, entre outros.

O espectro eletromagnético continua ainda sendo disputado por vários serviços de telecomunicações, tais como: sistemas de rádio navegação (GLONASS, GPS, Galileo, Beidou, entre outros), radares veiculares, TV digital, serviço de internet, dentre outros, desafiando constantemente os profissionais da área de telecomunicações no desenvolvimento de novas estruturas, equipamentos, configurações de circuitos e de antenas, Figura 1-1 [9]-[12].

É neste contexto, que as superfícies seletivas em frequência, FSS (do inglês *Frequency Selective Surfaces*) vêm se destacando em diversas aplicações na área de telecomunicações. As FSS são estruturas periódicas, geralmente planares, dispostas sobre uma superfície dielétrica, apresentando, basicamente, elementos de dois tipos diferentes, conhecidos como elemento do tipo *patch* e do tipo abertura. Essas estruturas apresentam uma resposta em frequência dependente da geometria da célula unitária, do tipo de elemento, das características do dielétrico (constante

dielétrica, altura, tangente de perdas etc.), da periodicidade do arranjo e da polarização da onda incidente [13]-[15].



Figura 1-1 - Sistemas de comunicação multifrequências [14].

Um dos parâmetros mais flexíveis no projeto de uma FSS é sua célula unitária [16], [17]. Em virtude desta característica, no GTEMA-IFPB (Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado do IFPB) vem sendo realizados estudos voltados ao desenvolvimento de novas geometrias para o elemento básico da FSS, dentre as quais podem ser citadas: estrela de quatro braços [13], matrioska [18], geometria em forma de U [19] e anéis trapezoidais [20], conforme ilustrado na Figura 1-2.

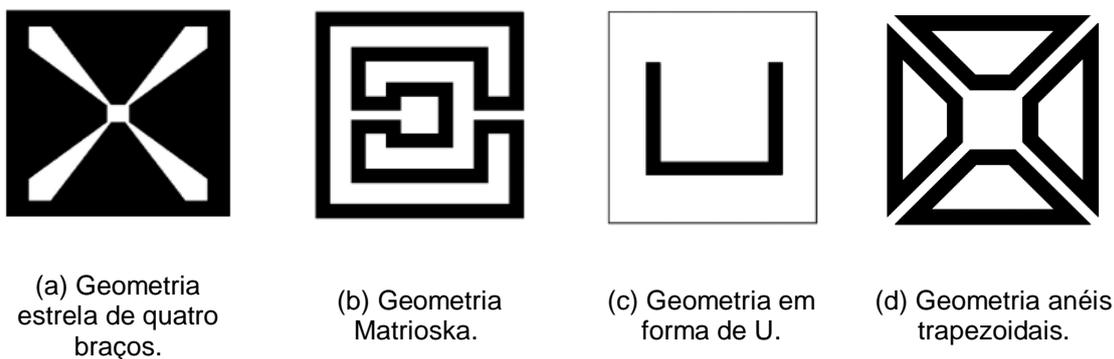


Figura 1-2- Geometrias desenvolvidas no GTEMA-IFPB.

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo do comportamento das FSS baseadas na geometria anéis trapezoidais abertos, dando assim prosseguimento aos estudos de novas geometrias para célula unitária de FSS realizados no GTEMA-IFPB. Para isso foram realizadas as caracterizações numérica e experimental da geometria proposta, assim como estabelecidas as equações iniciais de projeto.

1.1 Justificativa

Nos últimos anos, diversos grupos de pesquisa vêm dando uma grande relevância à investigação das FSS, principalmente por conta do potencial destas estruturas em aplicações destinadas aos sistemas de telecomunicações. As principais vantagens que têm interessado aos pesquisadores na utilização das FSS aplicadas nos sistemas de comunicações são: o seu baixo custo, peso e volume reduzidos, fabricação simples, possibilidade de integração com outros circuitos, redução do efeito de sinais indesejáveis, dentre outros [17], [21]-[24].

As FSS são usadas em praticamente todo o espectro eletromagnético, incluindo a faixa de micro-ondas, ondas milimétricas e frequências na faixa de terahertz (THz) [16], [26], demonstrando a versatilidade destas estruturas.

Neste contexto, várias pesquisas realizadas no GTEMA-IFPB, no decorrer últimos anos, têm sido voltadas ao desenvolvimento de novas geometrias para o elemento básico da FSS. Isto decorre principalmente da flexibilidade que as geometrias proporcionam, sendo possível obter respostas em frequências interessantes para aplicações nos mais diversos sistemas de comunicações existentes, como por exemplo, paredes inteligentes nas faixas de Wi-Fi de 2,4 GHz e 5,8 GHz, FSS reconfiguráveis e antenas inteligentes.

Dando prosseguimento às pesquisas realizadas no GTEMA-IFPB, este trabalho propõe verificar o comportamento da resposta em frequência e estabelecer as regras de projetos para a geometria baseada em anéis trapezoidais abertos. Ressalta-se que a geometria anéis trapezoidais foi proposta por Silva [20] e, dando continuidade ao estudo, neste trabalho são adicionadas aberturas aos anéis, obtendo-se uma diferente resposta em frequência.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Caracterizar numericamente e experimentalmente o comportamento de superfícies seletivas em frequência baseadas na geometria anéis trapezoidais abertos, estabelecendo as suas equações de projeto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Revisar a literatura referente às FSS, destacando suas principais características, tais como, geometria, dimensões, resposta em frequência, tipos e aplicações;
- Caracterizar numericamente a FSS baseada na geometria anéis trapezoidais abertos usando o *software* comercial ANSYS Designer;
- Analisar as respostas em frequência das FSS caracterizadas numericamente e experimentalmente validando os resultados obtidos;
- Estabelecer as equações iniciais de projeto das FSS;
- Documentar os trabalhos realizados através da publicação de artigos.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho organiza-se em 5 capítulos e seções, que são detalhados a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: No presente capítulo é introduzida a temática do estudo, a justificativa e os objetivos geral e específicos pretendidos para a realização do trabalho.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: Neste capítulo é apresentado o estado da arte acerca do tema, incluindo as fontes consultadas durante o desenvolvimento deste trabalho, tais como, artigos científicos, livros, periódicos, dissertações e teses, usados para fomentar a discussão e conseqüentemente a validação da pesquisa.

Capítulo 3 – Geometria Anéis Trapezoidais Abertos: Este capítulo aborda o projeto da célula unitária da FSS baseada na geometria anéis trapezoidais abertos, tais como, os principais parâmetros usados para o projeto da célula unitária, as equações

inicias de projeto e algumas peculiaridades observadas durante as simulações das estruturas projetadas.

Capítulo 4 – Resultados Numéricos e Experimentais: Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante as simulações utilizando o *software* comercial ANSYS Designer e o *setup* utilizado na caracterização experimental das estruturas fabricadas, bem como, a sobreposição dos dados obtidos nas análises numérica e experimental, sendo discutidas as características de cada estrutura, em ambas as análises, validando o estudo.

Capítulo 5 – Conclusão: Este capítulo traz as considerações finais, as sugestões para trabalhos futuros e os trabalhos publicados em eventos relacionado ao tema de estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado um breve histórico do desenvolvimento das superfícies seletivas em frequência e como os seus diferentes elementos (preenchimento e geometria da célula unitária, sua espessura, excitação dos arranjos, por exemplo) são responsáveis por definir sua resposta em frequência. Além disso, são ilustradas algumas aplicações que utilizam FSS e as principais técnicas usadas para a caracterização numérica e experimental destas estruturas.

2.1 Superfícies seletivas em frequência

O estudo das superfícies seletivas em frequência iniciou-se por volta do século XVIII, tendo como um dos principais pesquisadores o físico americano David Rittenhouse, que ao realizar um experimento utilizando um lenço de seda, notou que algumas cores do espectro de luz eram suprimidas quando observadas através do mesmo. Posteriormente, Rittenhouse avançou seus estudos, desta vez utilizando-se de uma grade de difração óptica, com o intuito de decompor um feixe luminoso policromático [16], [17], [25], [27].

A grade de difração construída pelo físico possuía arranjos de fios igualmente espaçados entre si. Com isso, foi possível observar que ao colocar o anteparo em direção à luz, o mesmo comportava-se como um filtro, impedindo a passagem de determinados comprimentos de onda. Com a realização do experimento, Rittenhouse concluiu que a disposição física de cada elemento, o espaçamento entre eles e se eram condutores ou não, influenciavam diretamente na distribuição do campo sobre a estrutura, concluindo que esses aspectos físicos estavam ligados diretamente à resposta em frequência obtida [17], [25], [27].

As FSS são estruturas periódicas, geralmente planares, constituídas de uma camada de metal sobre um ou mais substratos dielétricos, Figura 2-1. Uma das suas principais propriedades é a capacidade de se comportar como uma interface transparente, ou não, a uma onda incidente em determinadas frequências. Seus elementos podem ser do tipo *patch* condutor (camada de metalização) ou do tipo abertura (*slot*), [13], [14], [19], [21], [25], [31], [32].

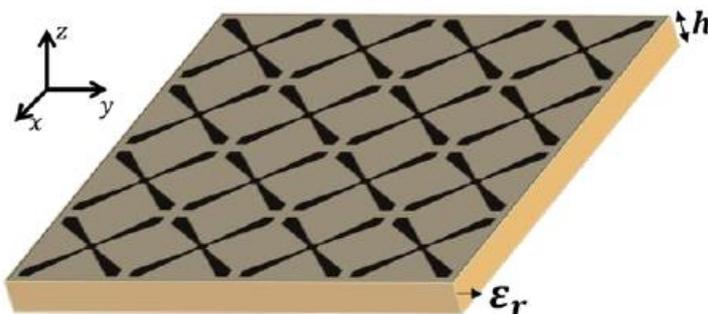


Figura 2-1 - Geometria básica de uma FSS [31].

Fundamentalmente a resposta em frequência das FSS depende da geometria do elemento básico do arranjo, do tipo de elemento (abertura ou *patch*), das características construtivas do substrato dielétrico (altura, constante dielétrica, tangente de perdas, entre outros), da periodicidade do arranjo e da polarização da onda incidente, conforme a Figura 2-2 [19], [21], [25], [31]-[34].

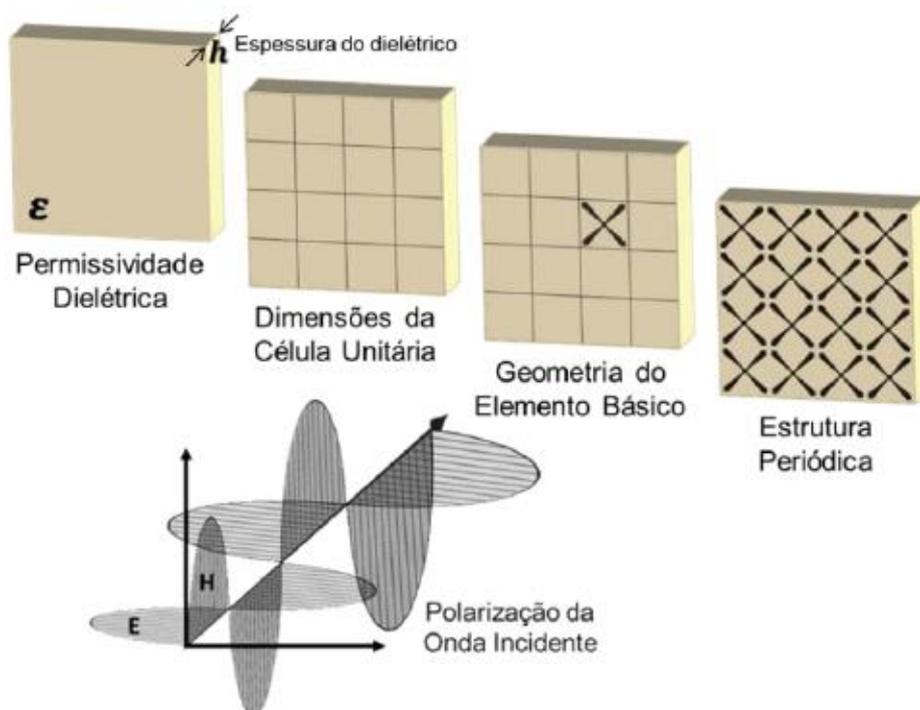


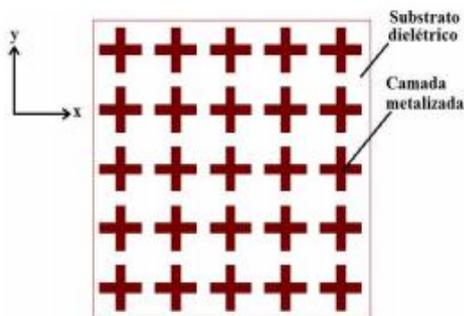
Figura 2-2 - Parâmetros que influenciam na resposta em frequência da FSS [31].

2.2 Classificação das FSS

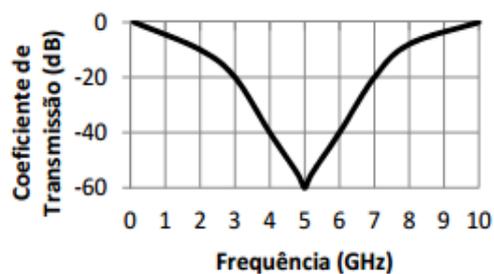
Na literatura são encontradas diferentes maneiras para a classificação das FSS. A seguir são apresentadas algumas dessas classificações [20], [24], [35].

2.2.1 Classificação das FSS quanto ao preenchimento da célula unitária

Basicamente, as FSS apresentam uma resposta em frequência do tipo rejeita faixa, para as geometrias tipo *patch* condutor, Figura 2-3, e do tipo passa faixa, para as geometrias tipo *slot*, Figura 2-4, [36].

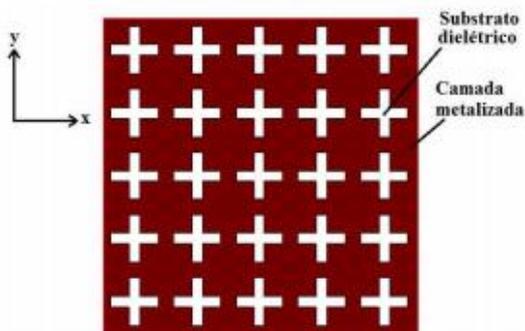


(a) FSS tipo *patch* condutor.

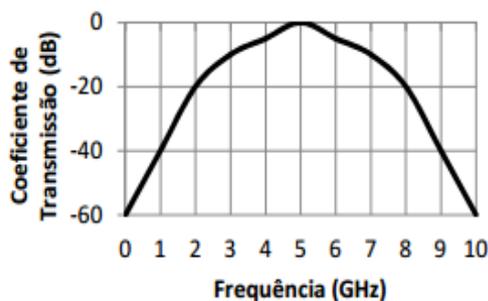


(b) Resposta em frequência.

Figura 2-3 - FSS com elementos do tipo *patch* condutor [18].



(a) FSS tipo abertura ou *slot*.



(b) Resposta em frequência.

Figura 2-4 - FSS com elementos do tipo abertura ou *slot* [18].

A FSS do tipo abertura atua como um filtro passa-faixa e na medida em que os elementos da estrutura vão entrando na ressonância, a mesma torna-se transparente para a onda incidente, até que na frequência de ressonância da estrutura, ocorre a total transmissão da onda incidente, ou seja, o sinal passa através da estrutura com um mínimo de perda de inserção. Para as frequências fora da faixa de ressonância, o sinal é refletido [17], [37], [38].

Já a FSS do tipo *patch* condutor comporta-se como um filtro rejeita-faixa e quando os elementos vão entrando em ressonância ocorre a radiação da potência incidente na direção de reflexão, até que na frequência de ressonância da estrutura, essa radiação faz a estrutura se comportar como um condutor perfeito, refletindo quase que totalmente a onda incidente [28], [39].

2.2.2 Classificação das FSS quanto à geometria do elemento da célula unitária

A geometria do elemento da célula unitária utilizado em uma FSS está diretamente relacionada com sua frequência de operação. Na literatura são encontrados diversos estudos utilizando uma variedade de geometrias para a célula unitária. Essas geometrias são classificadas em quatro grandes grupos, a partir dos quais podem ser feitas combinações para se gerar novos modelos de FSS com características únicas [25], [35], [39].

- **Grupo I:** relaciona-se aos n-polos conectados pelo centro. Os mais conhecidos são o dipolo fino, o dipolo cruzado, a cruz de Jerusalém e o tripolo, conforme ilustrado na Figura 2-5.

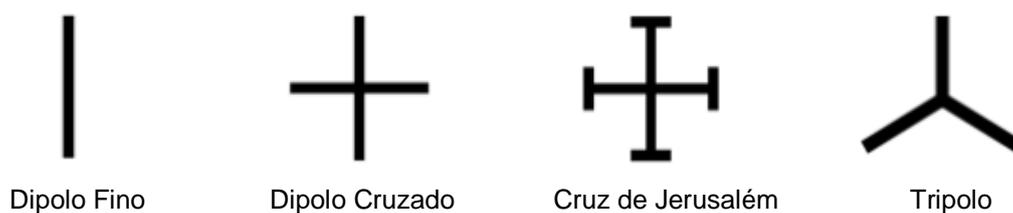


Figura 2-5 - Grupo 1 n-polos conectados pelo centro [18]-[25].

- **Grupo II:** agrupa os elementos do tipo espira. Os mais conhecidos são as espiras quadradas, quadradas duplas, quadradas com grades e os anéis circulares concêntricos (Figura 2-6).



Figura 2-6 - Grupo 2 elementos tipo espiras [18]-[25].

- **Grupo III:** composto pelos elementos de interior sólido, como ilustrado na Figura 2-7. Os mais comuns são: os *patches* retangulares, hexagonais e circulares.



Figura 2-7 - Grupo 3 elementos de interior sólido [18]-[25].

- **Grupo IV:** esse grupo é constituído por elementos formados a partir da modificação e combinação de elementos típicos. A lista de elementos é infinita. Na Figura 2-8 são ilustrados alguns exemplos de combinações de elementos de FSS do grupo 4.

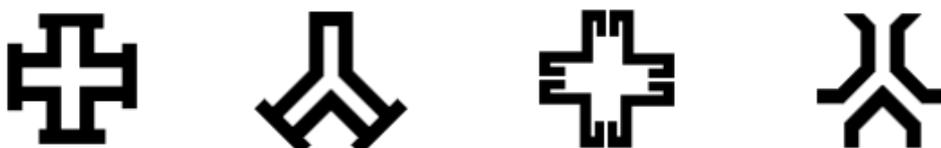
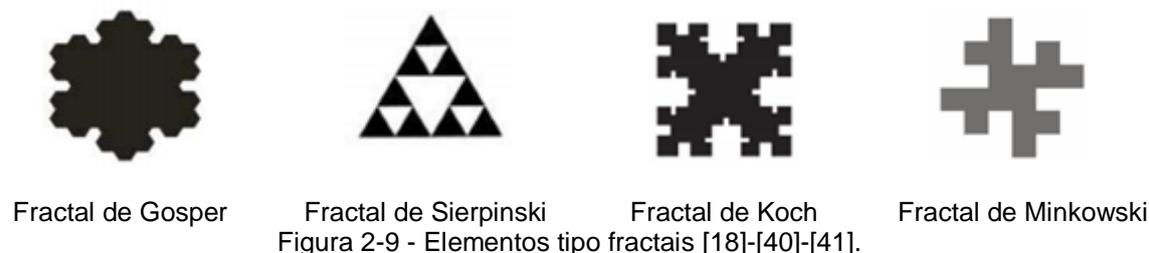
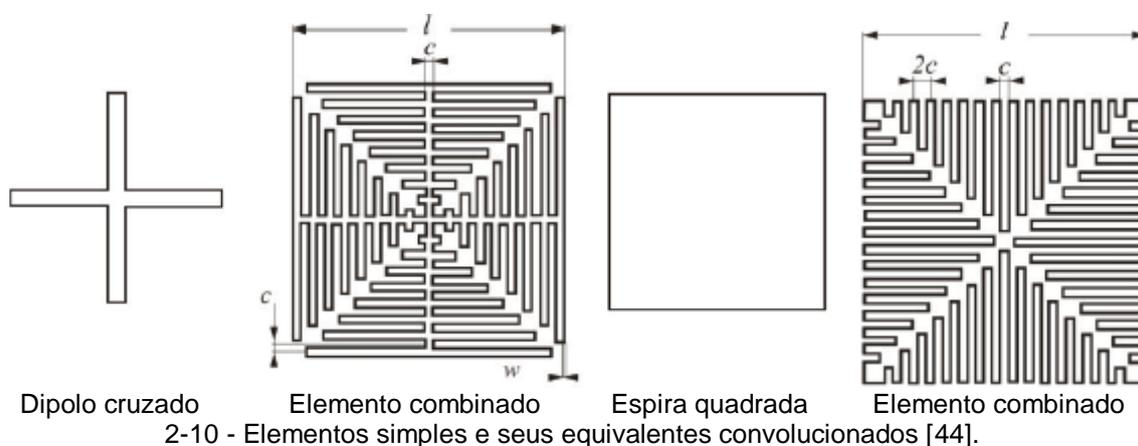


Figura 2-8 - Grupo 4 elementos tipo combinações [14]-[19]-[25].

Além das geometrias apresentadas nos quatro grupos, é importante destacar o uso de elementos fractais em FSS, conforme ilustrado na Figura 2-9. A utilização deste tipo de geometria apresenta uma redução nas dimensões dos elementos e a operação em múltiplas faixas de frequências [40].



Nos últimos anos, na literatura, tem sido mostrado que os elementos convolucionados vêm sendo bastante utilizados. Os estudos mostram que estes tipos de elemento apresentam melhoria na estabilidade angular da resposta em frequência da FSS e uma maior largura de banda com elementos reduzidos. Por apresentar tamanho reduzido esse tipo de elemento é utilizado em projetos de baixa frequência, sendo viável devido ao aumento de seu comprimento elétrico [42]-[44]. A Figura 2-10 ilustra dois tipos de elementos convolucionados.



2.2.3 Classificação das FSS quanto à espessura

As FSS podem ainda ser classificadas em anteparo fino e espesso. As FSS de anteparo fino são aquelas que possuem espessura da camada de metalização menor que $0,001\lambda_0$, onde λ_0 é o comprimento de onda para a frequência de ressonância da estrutura.

Geralmente, essas estruturas possuem volume pequeno, baixo peso e um custo reduzido, quando comparadas às FSS do tipo anteparo espesso, podendo ser fabricadas utilizando a tecnologia convencional de circuito impresso [17], [21], [25].

A técnica usada na fabricação das estruturas deste trabalho, geralmente utilizado no GTEMA - IFPB foi a tecnologia de circuito impresso realizada por meio da fixação do adesivo ao substrato dielétrico FR-4 e em seguida é realizada a coroação com auxílio do percloroeto de ferro.

Já as FSS de anteparo espesso apresentam uma camada de metalização mais espessa ou uma dupla camada de metalização, consistindo em duas FSS separadas por um dielétrico (cascateamento de FSS).

No cascateamento de FSS são usadas duas ou mais estruturas podendo ser do tipo *patch* condutor ou abertura, onde são empilhadas umas sobre as outras, separadas por um dielétrico, a fim de modificar o comportamento da estrutura. O dielétrico mais comum utilizado nesta técnica é o ar devido a sua baixa perda [44], [46]. Na Figura 2-11 é ilustrado uma FSS em cascata com duas camadas.

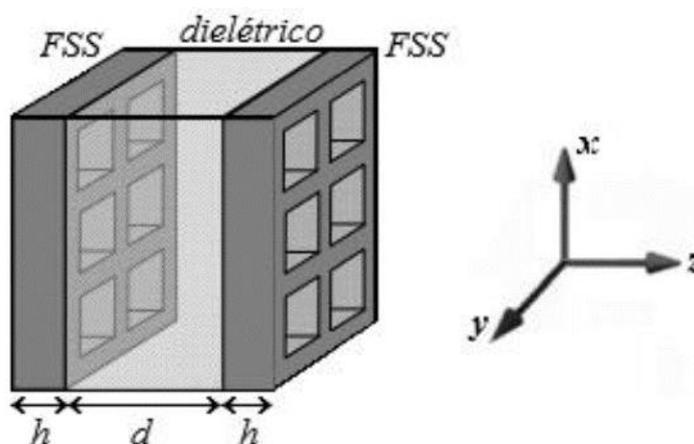


Figura 2-11 - FSS do tipo espessa de duas camadas [51].

Essa técnica proporciona um aumento na largura de banda da FSS. Além disso, podem ser usadas para melhorar a estabilidade angular e/ou atribuir características de multibanda à estrutura [47].

Estes tipos de estruturas apresentam características tais como um maior volume e peso, sendo geralmente usadas em filtros passa-faixa, através de elementos do tipo abertura [19], [48]; uma transição mais rápida da banda passante para a banda de rejeição, *roll-off*, e uma banda passante mais plana [49], [50], [52].

2.2.4 Classificação das FSS quanto à excitação dos arranjos

As formas de excitação dos arranjos nas FSS podem ser realizadas por meio de uma onda plana incidente ou por geradores individuais conectados a cada elemento.

No primeiro caso, a estrutura é conhecida como FSS passiva, em que os arranjos dos elementos podem se comportar como uma interface transparente ou não a onda incidente aplicada, dependendo do tipo de elemento (*abertura* ou *patch*).

Tais estruturas apresentam como vantagem a facilidade de projeto e fabricação. Entretanto, possuem como desvantagem o fato de não poderem ser reconfiguradas sem a inserção de componentes externos, tais como, diodos PIN, chaves MEMS, varactores, dentre outros [40], [51], [52]. Na Figura 2-12 são apresentados exemplos de FSS passiva e reconfiguráveis.

No segundo caso, geradores de tensão são acoplados aos elementos da FSS e devem possuir a mesma amplitude e variações lineares de fase ao longo do arranjo. Neste caso a FSS é denominada como ativa [17], [52].

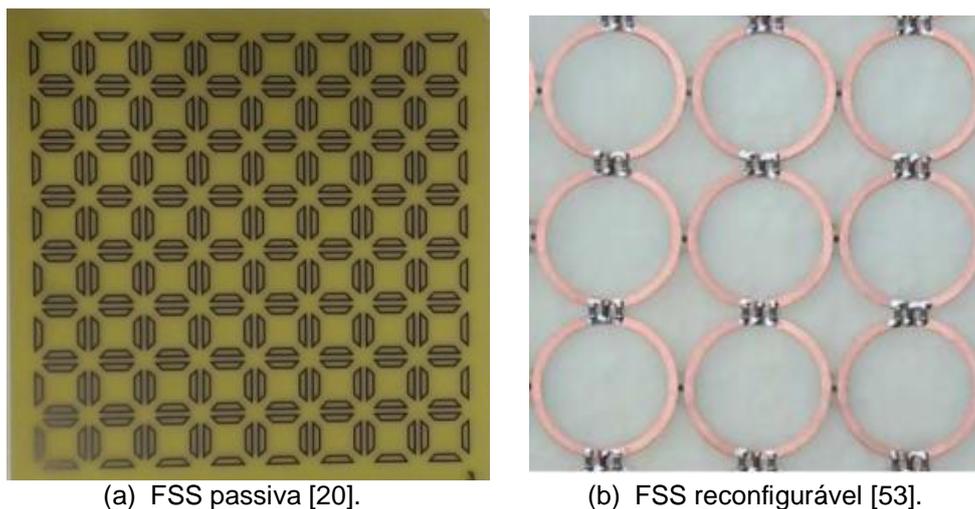


Figura 2-12 - Arranjos periódicos.

2.3 Aplicações de FSS

As FSS são usadas em diversas frequências do espectro eletromagnético, apresentando inúmeras aplicações. A seguir são apresentados alguns exemplos dessas aplicações.

2.3.1 Anteparo da porta de forno de micro-ondas

A aplicação mais conhecida da FSS é no anteparo da porta do forno de micro-ondas doméstico, Figura 2-13. Esta FSS atua como um filtro, permitindo a passagem da frequência de luz visível e rejeitando a faixa de micro-ondas em torno de 2,45 GHz [17].



Figura 2-13 - Aplicação da FSS como anteparo na porta do forno de micro-ondas [19].

2.3.2 Radomes

Uma das principais aplicações das FSS envolve o projeto de radomes e sub-refletores para antenas diretivas. Os radomes possuem características de um filtro passa-faixa. O sinal na frequência de operação da antena passa através do radome com um mínimo de perdas de inserção e fora desta faixa o sinal é refletido, evitando-se interferências indesejadas [18], [21], [51]. Na Figura 2-14, são mostrados exemplos de FSS utilizadas como radomes.

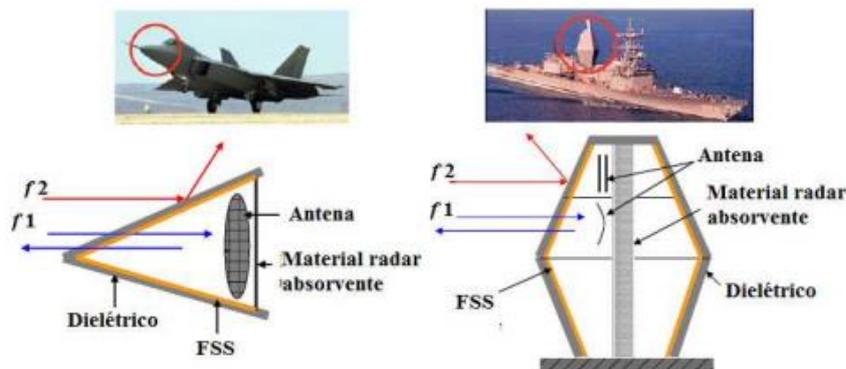


Figura 2-14 - Exemplo de aplicação de radomes [55].

2.3.3 Janelas eficientes

Uma aplicação bastante interessante é a utilização da FSS como janela eficiente. Esta técnica é implementada através da aplicação de uma camada metálica bem fina em projetos de janelas modernas de modo a proporcionar uma economia de energia. Conforme mostrada na Figura 2-15, a FSS atua como filtro que bloqueia a radiação eletromagnética na região infravermelha e é transparente na parte visível do espectro, rejeitando, desta forma, a transferência de calor de fora para dentro do ambiente no verão e vice-versa no inverno [44], [56].

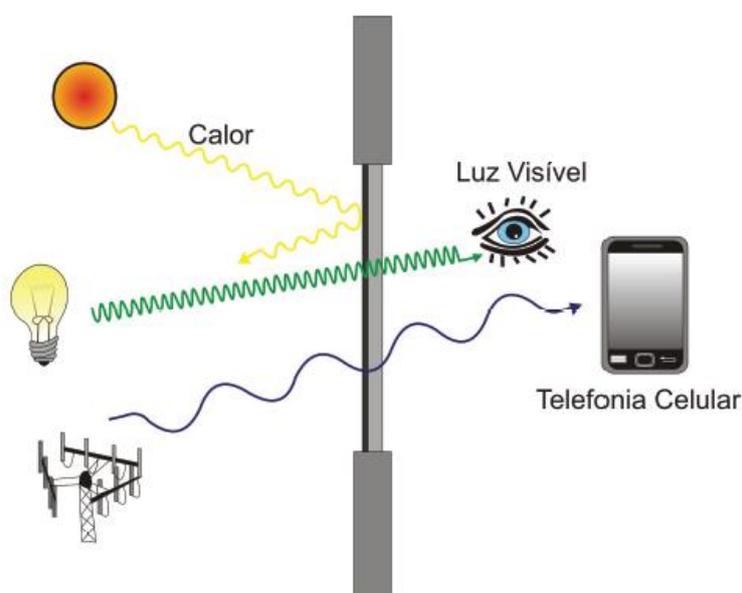


Figura 2-15 - Aplicação de FSS em janela eficiente [44].

2.3.4 Paredes inteligentes

Uma recente aplicação encontrada na literatura é a utilização de FSS, passivas ou reconfiguráveis, como paredes inteligentes [37], [56], [57]. Esta tecnologia vem sendo investigada como uma alternativa para aumentar a eficiência dos sistemas de comunicação sem fio em ambientes *indoor*, limitando a intensidade de sinais eletromagnéticos específicos, com o intuito de bloquear sinais indesejados, tanto para evitar interferências, como para garantir uma maior privacidade na transmissão de dados [58]-[61]. Na Figura 2-16 são mostradas as características das FSS usadas na implementação de paredes inteligentes.

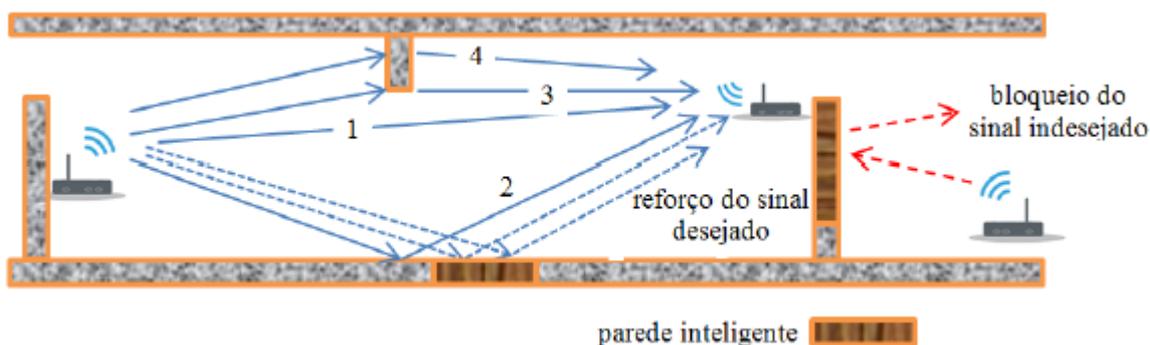


Figura 2-16 - Atuação das paredes inteligentes para melhoria do sistema de comunicação sem fio em ambiente *indoor* [56].

Além das aplicações anteriormente citadas, na literatura se encontram pesquisas utilizando as FSS em aplicações como, por exemplo, em sensores passivos sem fio [62], sistemas RFID sem chip (*chipless* RFID) [63] e antenas inteligentes do tipo comutável [23].

2.4 Técnicas de análise

2.4.1 Caracterização numérica

Várias técnicas são usadas para análise das FSS. Alguns autores desenvolveram fórmulas simples e aproximadas para a determinação das características de transmissão e de reflexão das FSS tipo *patch* condutor ou abertura retangulares. A complexidade da geometria é um fator que limita esse tipo de análise. Além disso, as fórmulas apresentam algumas limitações para aplicações específicas, podendo apresentar resultados incertos, principalmente para frequências mais elevadas e ressonâncias de ordem superior [17], [65]-[67].

A técnica de modelagem do circuito equivalente para FSS é destacado na Figura 2-17. Nele é possível prever o comportamento da FSS em função da frequência, modelando-se um circuito LC (indutor e capacitor), onde o mesmo pode ser alterado a partir de modificações na geometria do elemento da célula unitária. Estas modificações podem tornar a modelagem mais complexa, impossibilitando a determinação analítica dos elementos do circuito reativo [69]. Essa técnica necessita de recursos computacionais limitados, quando comparados aos métodos de análise

de onda completa, sendo útil para prever com rapidez o desempenho das estruturas.

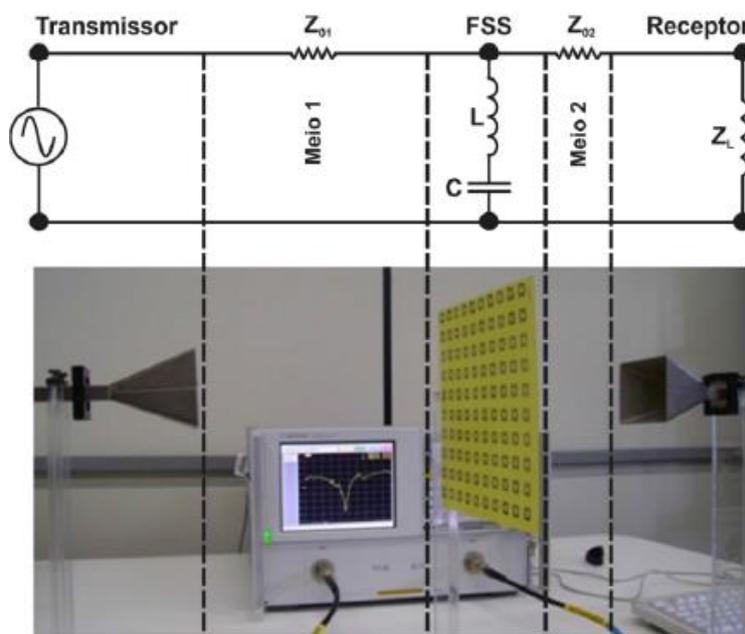


Figura 2-17 - Circuito equivalente, *setup* de medição [19].

Um dos métodos numéricos mais empregado na análise de FSS é o Método dos Momentos (MoM) [17]. Este Método é baseado nas correntes de superfície que são usadas para modelar o *patch* e nas correntes de polarização volumétricas que são utilizadas para o modelamento dos campos ao longo do material dielétrico. O MoM considera os efeitos das ondas de superfície fora do limite físico do *patch* bidimensional fornecendo uma solução mais precisa quando comparado aos métodos dos circuitos equivalentes, [68], [69].

Com a evolução da tecnologia, diversos métodos computacionais empregados na análise das FSS surgiram como soluções mais rápidas e precisas. Dentre os mais conhecidos, pode-se citar: Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite-Element Method*) [70], [71]; Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD – *Finite Difference Time Domain*) [72], [73] e o Método Iterativo das Ondas (WCIP – *Wave Concept Iterative Procedure*) [74], [75].

Vale ressaltar que outras técnicas podem ser usadas para a caracterização numérica das FSS em conjunto com esses métodos. Neste trabalho será utilizado o Método dos Momentos, no qual se baseia o *software* ANSYS Designer.

2.4.2 Caracterização experimental

Na realização das medições das propriedades de transmissão e reflexão das FSS podem ser utilizados diferentes tipos de *setup* para a caracterização experimental. A seguir são demonstrados alguns exemplos.

O *setup* para a medição é organizado de forma que a FSS esteja posicionada entre as antenas, como ilustrado na Figura 2-18. Desta maneira, uma das antenas funcionará como transmissora e a outra como receptora.



Figura 2-18 - *Setup* de medição para FSS [18].

A onda eletromagnética emitida incide sobre a FSS, refletindo ou deixando passar parte da potência, de acordo com suas características. Parte da potência que atravessa a FSS, denominada potência transmitida, é captada pela antena receptora, sendo, desta forma, possível realizar a caracterização da resposta em frequência da FSS. A medição na polarização invertida é obtida realizando uma rotação de 90° na FSS [16], [18], [29], [51].

Alguns erros podem ser ocasionados ao se utilizar este tipo de *setup* de medição, em virtude das difrações ocasionadas pelas bordas da FSS, oriundas da largura de feixe das antenas cornetas e do tamanho relativamente pequeno da FSS. Outra possível fonte de erro encontrada nesta técnica é a presença de sinais refletidos no próprio ambiente de medição, sendo esse mais crítico quando se deseja caracterizar FSS do tipo passa-faixa [18], [51].

Para realizar uma otimização no processo de medição pode-se utilizar lentes em conjunto com as antenas cornetas, Figura 2-19. Esta otimização reduz consideravelmente o efeito da difração nas extremidades da FSS, desde que o feixe Gaussiano produzido pelas lentes incida sobre a FSS [16], [18].

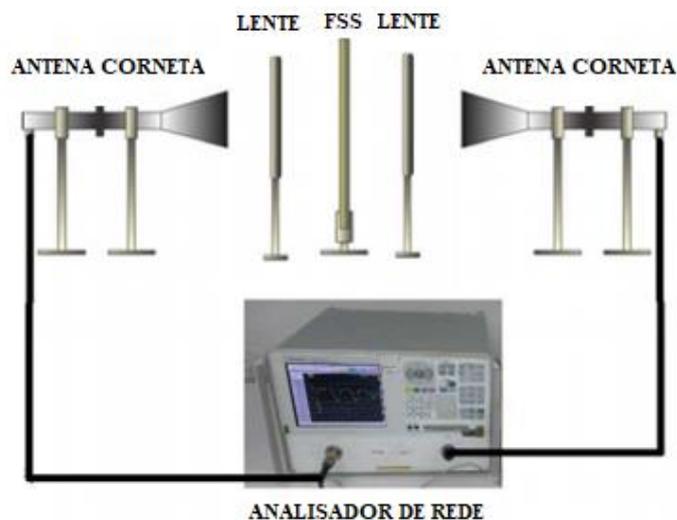


Figura 2-19 - Esquema de um setup de medições de FSS com lentes [18].

Outra forma para se obter uma maior precisão nos resultados é a utilização de câmara anecóica, Figura 2-20, produzindo um ambiente livre de interferências por estar revestido de materiais absorvedores que eliminam as reflexões desnecessárias.

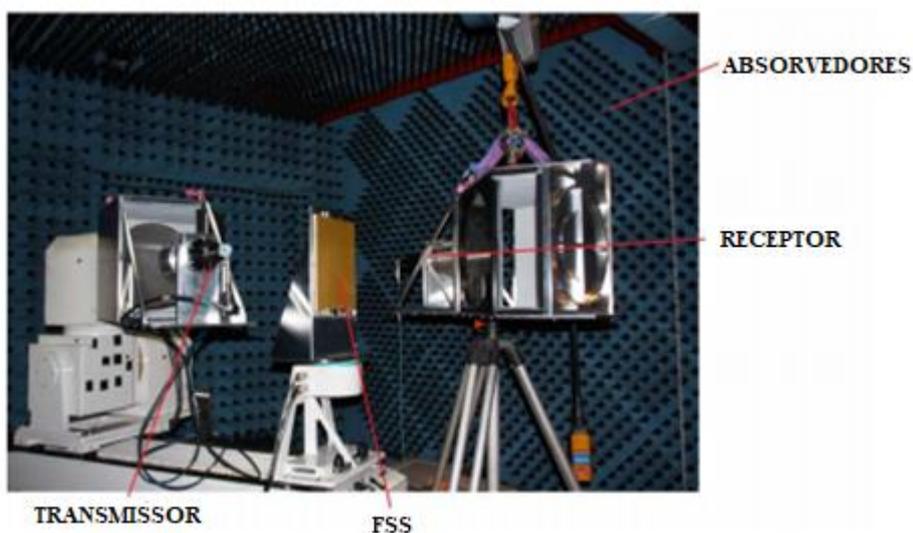


Figura 2-20 - Esquema de medição da FSS com câmara anecóica [18].

Neste trabalho são abordadas as características de FSS passivas não reconfiguráveis, do tipo anteparo fino. A caracterização numérica foi realizada

utilizando-se o *software* comercial ANSYS Designer, baseado no Método dos Momentos, enquanto que para a caracterização experimental das estruturas foi utilizado o *setup* ilustrado na Figura 2-18.

3. GEOMETRIA ANÉIS TRAPEZOIDAIS ABERTOS

Neste trabalho se propõe o desenvolvimento de uma FSS com elementos baseados na geometria de anéis trapezoidais abertos. Esta geometria é uma variação da geometria anéis trapezoidais desenvolvidos no GTEMA–IFPB, em um trabalho apresentado por Silva [20].

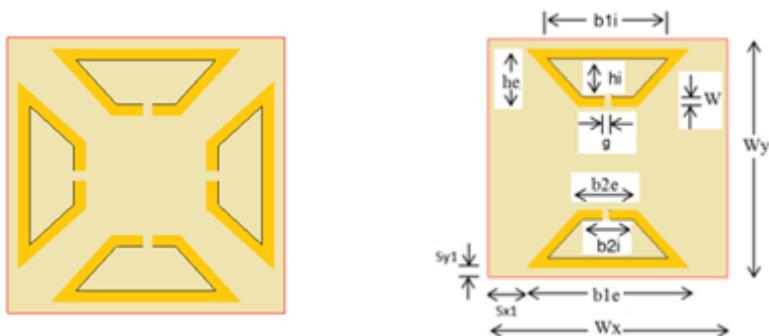
A geometria estudada apresenta características muito interessantes, tais como tamanho reduzido e a possibilidade de ajustar uma das frequências de ressonância mantendo a outra praticamente inalterada, o que ficará mais claro ao longo deste e do próximo capítulo. Outros aspectos abordados neste trabalho é o efeito da polarização na resposta em frequência.

São propostas equações iniciais de projeto para o cálculo das duas primeiras frequências de ressonância. Foram projetadas quatro FSS com diferentes dimensões. Com isso, foi analisado o comportamento da resposta em frequência de cada FSS e investigado as potencialidades e limitações das mesmas.

3.1 Descrição do projeto

A célula unitária proposta neste trabalho consiste na disposição de um arranjo de quatro anéis baseados na geometria de um trapézio com aberturas em cada um deles, sendo dispostos em pares de anéis horizontais e verticais.

A Figura 3-1 ilustra os principais parâmetros considerados para o dimensionamento dos trapézios externos e internos que formam a estrutura estudada, onde cada anel é dimensionado separadamente. Apesar de a geometria apresentar a flexibilidade do dimensionamento em separado de cada anel, no estudo inicial foram considerados os quatro anéis idênticos.



(a) Célula unitária.

(b) Parâmetros usados para dimensionamento dos anéis externos e internos.

Figura 3-1 - Geometria anéis trapezoidais abertos.

Onde:

- W_x : largura da célula unitária ao longo do eixo x ;
- W_y : largura da célula unitária ao longo do eixo y ;
- S_{x1} : localização inicial da base maior do trapézio ao longo do eixo x ;
- S_{y1} : localização inicial da base maior do trapézio ao longo do eixo y ;
- b_{1e} : largura da base maior do trapézio, lado externo;
- b_{1i} : largura da base maior do trapézio, lado interno;
- b_{2e} : largura da base menor do trapézio, lado externo;
- b_{2i} : largura da base menor do trapézio, lado interno;
- W : largura da fita do anel;
- h_i : altura interna do anel;
- h_e : altura externa do anel;
- g : largura da abertura.

Uma característica peculiar constatada durante a análise numérica está relacionada à excitação dos anéis em pares, de acordo com a direção do campo elétrico, Figura 3-2.

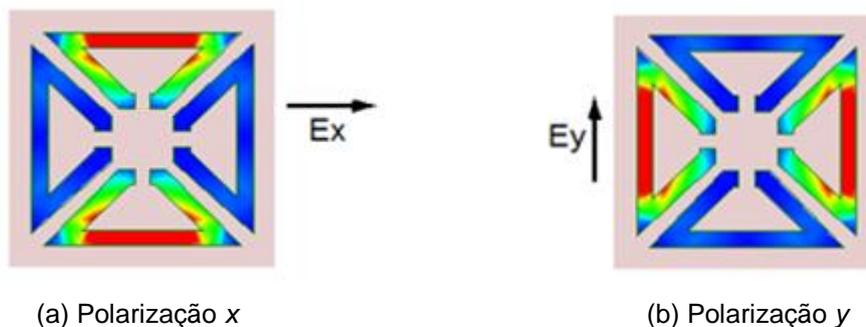


Figura 3-2 - Polarização dos anéis trapezoidais.

Conforme ilustrado na Figura 3-3, para uma dada polarização, a primeira ressonância é devida aos anéis trapezoidais abertos paralelos à direção do campo elétrico. Por outro lado, os anéis trapezoidais abertos perpendiculares à direção do campo elétrico proporcionam a segunda frequência de ressonância.

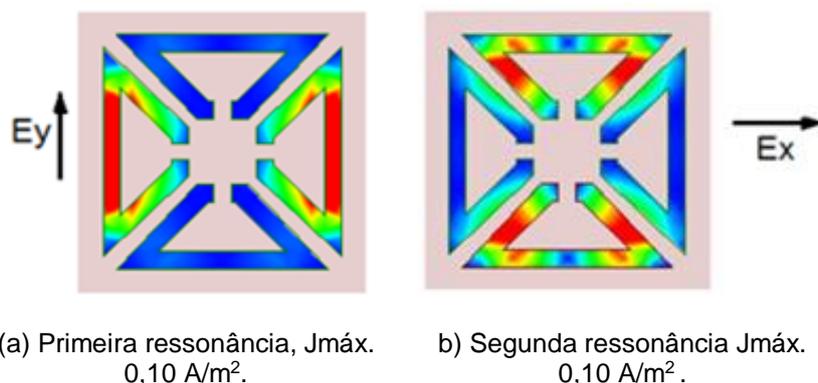


Figura 3-3 - Densidade de corrente elétrica para as duas primeiras frequências de ressonância e polarização.

Mesmo os quatro anéis trapezoidais abertos possuindo dimensões iguais, o comprimento efetivo dos anéis trapezoidais perpendiculares e paralelos ao campo elétrico incidente são diferentes e, conseqüentemente, produzem diferentes frequências de ressonâncias.

Neste trabalho são propostas duas equações aproximadas para as duas primeiras frequências de ressonância. Destaca-se que essas ressonâncias podem se degenerar em uma única frequência de ressonância, dependendo das dimensões dos anéis trapezoidais abertos.

Além disso, vale ressaltar que essas são equações iniciais de projeto, a primeira etapa para um processo de otimização numérica. A primeira frequência de ressonância é dada por:

$$f_{r1}(GHz) = \frac{0,3}{2l_{1ef}\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (1)$$

onde, ϵ_{ref} é a constante dielétrica efetiva para uma guia de onda coplanar sem plano de terra [76] como ilustrado na Figura 3-4. Nesta figura, o parâmetro $s = 10 \times h$ e a largura da fita central é igual à largura da fita do anel trapezoidal aberto (W). O valor da constante dielétrica efetiva pode ser facilmente calculado utilizando *softwares* como, *Appcad* [78] e o *Microwaves101.com* [79].

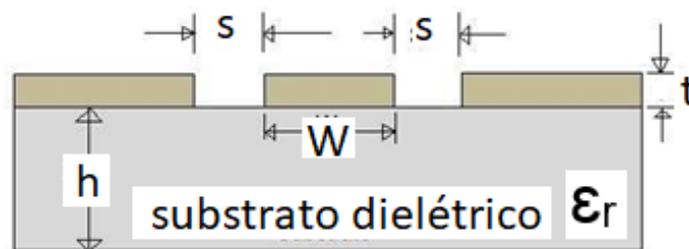


Figura 3-4 - Guia de ondas coplanar (CPW) sem plano terra [77].

O parâmetro l_{1ef} é o comprimento médio do anel trapezoidal aberto, cuja base menor é paralela ao campo elétrico.

$$l_{1ef} = \frac{(p_{ext} + p_{int})}{2} \quad (2)$$

$$p_{ext} = b_{1e} + b_{2e} + 2\sqrt{(b_{1e} - b_{2e})^2 + h_e^2} \quad (3)$$

$$p_{int} = b_{1i} + b_{2i} + 2\sqrt{(b_{1i} - b_{2i})^2 + h_i^2} \quad (4)$$

$$b_{1i} = b_{1e} - 2W \left(\frac{1}{tg(\theta)} + \frac{1}{sin(\theta)} \right) \quad (5)$$

$$b_{2i} = b_{1i} - \frac{2h_i}{tg(\theta)} \quad (6)$$

$$h_i = h_e - 2W \quad (7)$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{2h_e}{b_{1e} - b_{2e}} \right) \quad (8)$$

Já a segunda frequência de ressonância é dada por:

$$f_{r2}(\text{GHz}) = \frac{0,3}{2l_{2ef}\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (9)$$

onde, l_{2ef} é a largura da base maior do trapézio, lado externo, que é perpendicular à direção do campo elétrico, menos a largura da abertura.

$$l_{2ef} = b_{1e} - g \quad (10)$$

Uma vez estabelecidas as equações de projetos e analisada a resposta em frequência da FSS, foram projetadas e caracterizadas FSS, o que será visto no Capítulo 4.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Na verificação das características da geometria proposta, quatro FSS foram projetadas, fabricadas e caracterizadas. A análise numérica foi realizada utilizando o *software* comercial ANSYS Designer [80].

Os resultados da caracterização experimental foram obtidos para a faixa de frequência de 4,4 a 14 GHz, no Laboratório de Micro-Ondas do GTEMA/IFPB, utilizando um analisador de rede vetorial de duas portas modelo Agilent E5071C, dois pares de antenas tipo cornetas padrão, sendo um par de antenas modelo PE9859-20, faixa de frequência de 4,5 a 8,0 GHz e ganho 20 dB. O outro par de antenas usado foi modelo SIC 532, faixa de frequência de 7 a 14 GHz e ganho 15 dB.

Uma base rotatória foi usada para apoiar a FSS, na realização das medições considerando diferentes ângulos de incidência da onda a partir do movimento mecânico da mesma, Figura 4 - 1.

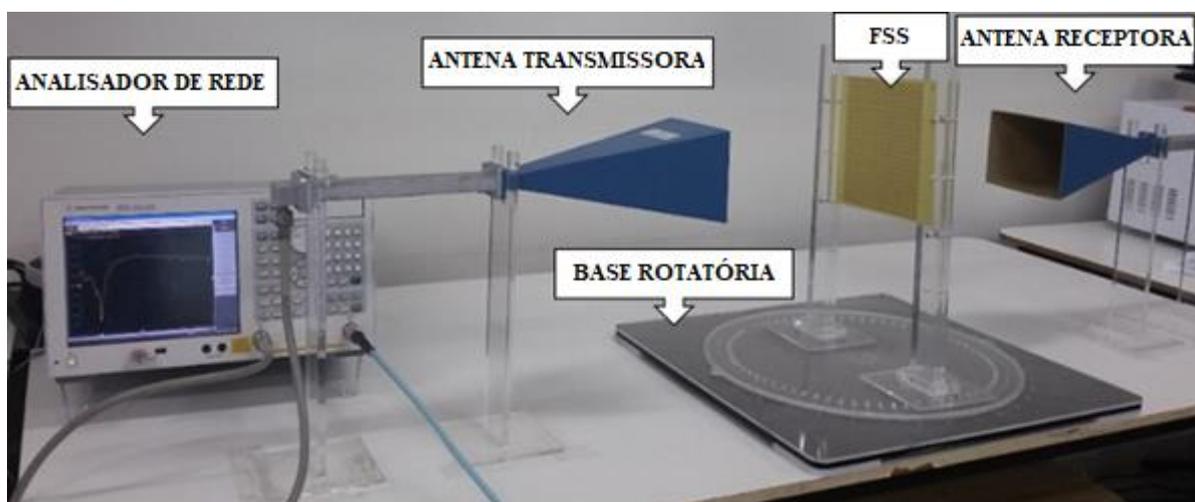


Figura 4-1 - Setup de medições.

As FSS foram fabricadas utilizando o laminado de baixo custo do tipo FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$, altura $h = 1$ mm e tangente de perdas de 0,02). As células unitárias foram projetadas com dimensões de 16 mm x 16 mm, as estruturas foram fabricadas com uma placa medindo 192 mm x 192 mm e as células unitárias foram agrupadas em arranjos de 12 x 12, conforme ilustrado nas Figuras 4 - 2 e 4 - 3.

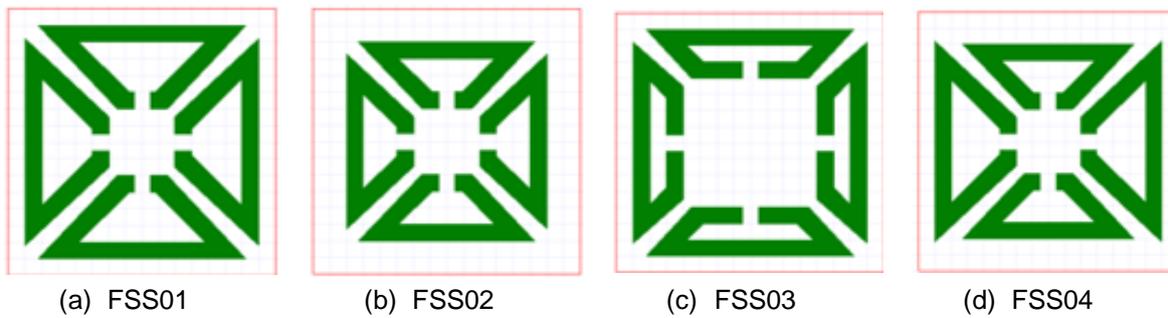
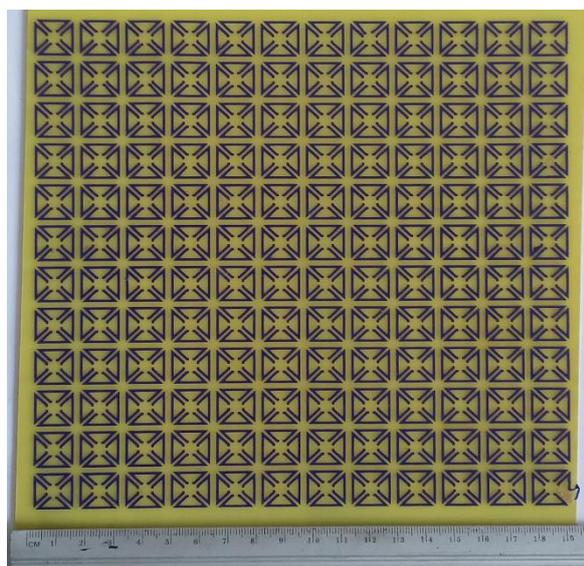
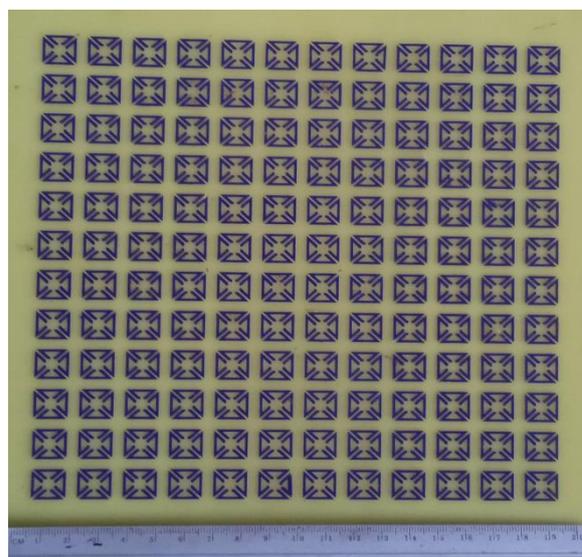


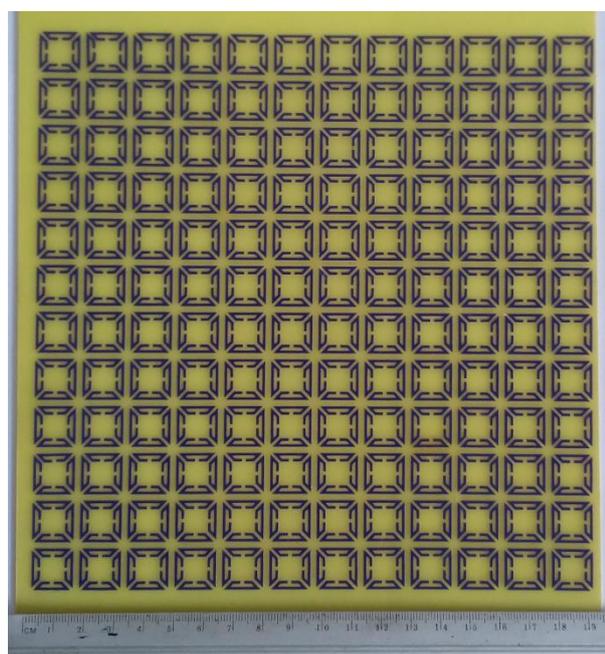
Figura 4-2 -Célula unitária da FSS.



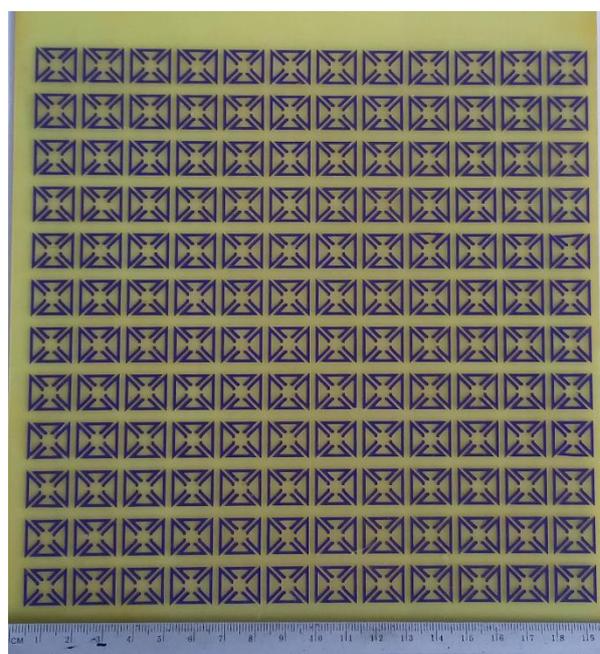
(a) FSS01



(b) FSS02



(c) FSS03



(d) FSS04

Figura 4-3 – FSS fabricadas.

O comprimento da abertura do anel, g , é igual à largura da fita, W , sendo esta de 1 mm. As dimensões dos anéis trapezoidais abertos são descritas na Tabela 1, de acordo com as especificações descritas na Figura 3-1.

Tabela 1 – Dimensões das FSS.

	Sx1	Sy1	b1e	b2e	he
FSS01	1.8	1.0	12.4	3.0	5.0
FSS02	2.7	2.0	10.6	3.0	4.0
FSS03	1.8	1.0	12.4	7.0	3.0
FSS04	2.7/1.8	2.0/1.0*	10.6/12.4*	3.0	4.0/5.0*

Observação: Todas as dimensões em mm / * Anel trapezoidal aberto vertical.

Os dados obtidos a partir da análise numérica e da análise experimental foram comparados onde é possível observar a variação do coeficiente de transmissão (parâmetro S21) em função da frequência.

Na Figura 4-4 é mostrada a resposta em frequência para o FSS01, apresentando uma boa concordância entre resultados medidos e numéricos. Como se trata de uma geometria simétrica, apenas a resposta da polarização y é apresentada.

Quando comparados aos resultados medidos e numéricos, as frequências de ressonância calculadas usando as equações (1) e (9) apresentaram uma diferença inferior a 5%, o que é uma boa aproximação para uma otimização numérica posterior, como mostrados na Tabela 02.

A terceira frequência de ressonância não será discutida neste trabalho, pois comumente nos estudos de FSS abordados na literatura apenas considera-se para análise a primeira frequência de ressonância. Como este trabalho analisa as duas

primeiras frequências de ressonância, optou-se por desconsiderar a terceira ressonância.

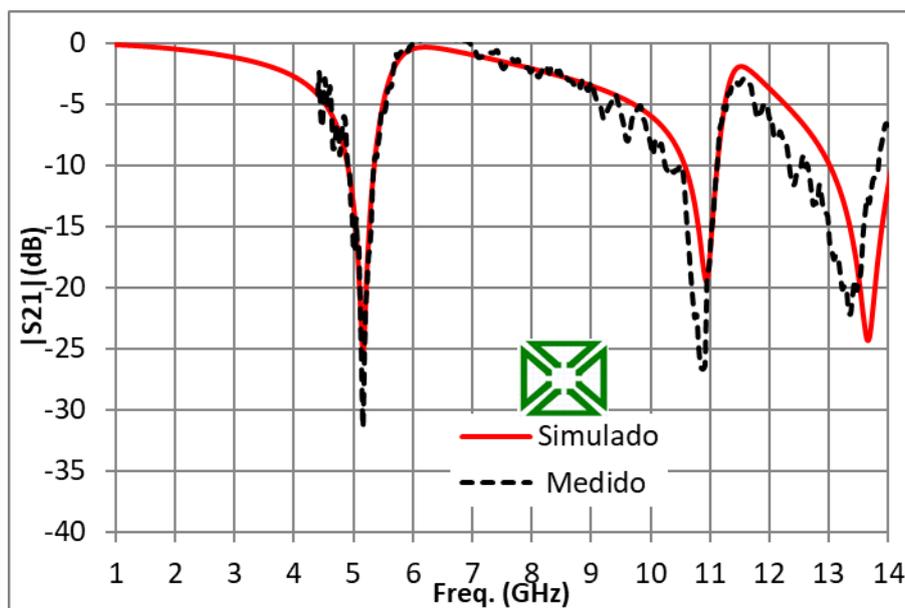


Figura 4-4 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS01, pol. y.

A resposta em frequência da FSS02 é apresentada na Figura 4-5, verificando-se uma boa concordância entre resultados medidos e numéricos. Analogamente à FSS01, apenas a polarização y é considerada.

Foi observado que à medida que todas as dimensões dos anéis trapezoidais abertos foram reduzidas, as duas primeiras frequências de ressonância aumentaram em relação a FSS01. Mais uma vez, os resultados obtidos utilizando as equações (1) e (9), apresentaram bons resultados quando comparados aos medidos, obtendo uma diferença inferior a 5%, conforme a Tabela 02.

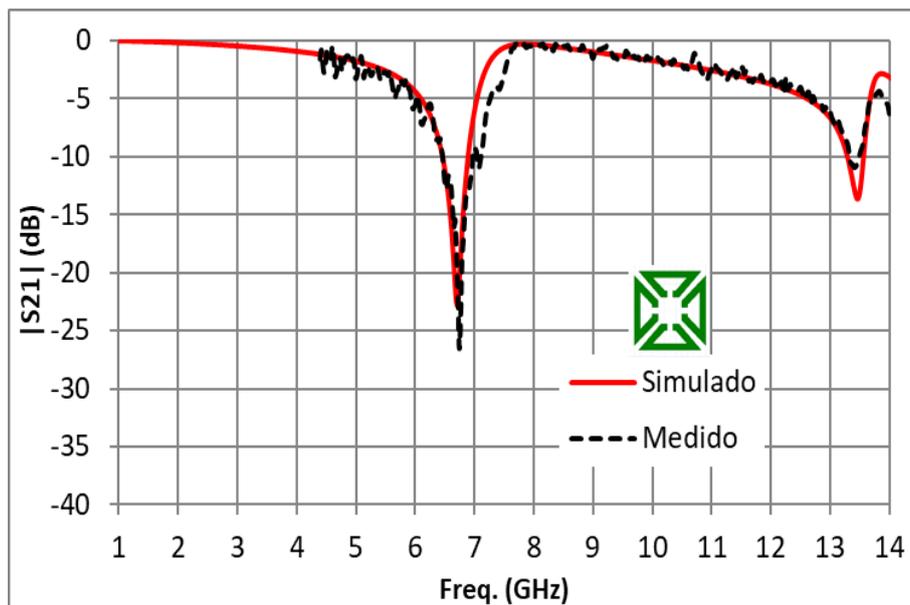


Figura 4-5 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS02, pol. y.

Na FSS03, para a polarização y, a primeira frequência de ressonância está relacionada ao comprimento dos anéis verticais e como esta dimensão foi reduzida, a frequência aumentou quando comparada à FSS01. Por outro lado, a segunda ressonância está relacionada ao comprimento da maior base dos anéis trapezoidais abertos horizontais e, como este é o mesmo da FSS01, essas ressonâncias (segunda ressonância para FSS01 e FSS03) são quase iguais. Esse comportamento pode ser visto na Figura 4-6. Observou que os resultados obtidos com as equações (1) e (9) foram bastante satisfatórios (Tabela 02).

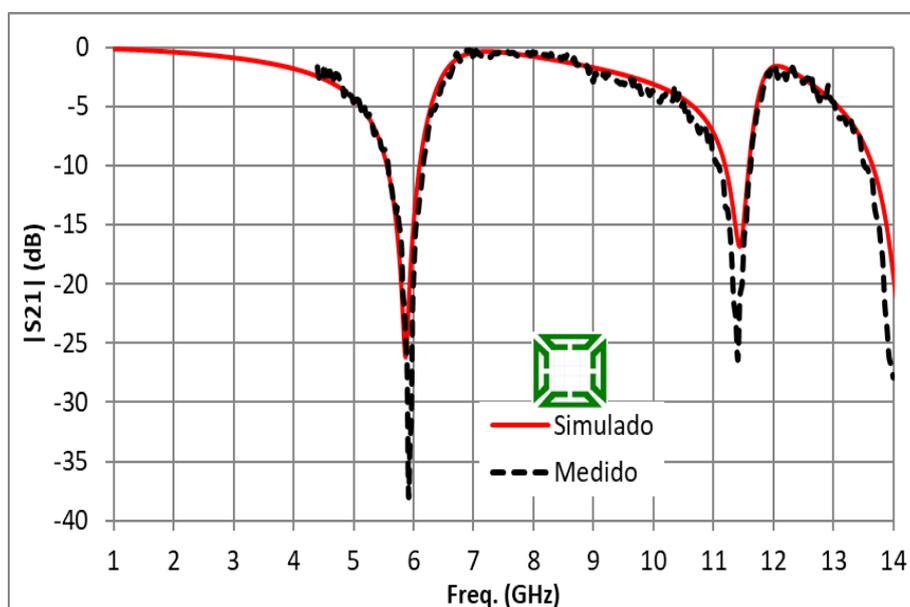


Figura 4-6 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS03, pol. y.

A FSS04 possui uma geometria assimétrica e a resposta em frequência depende da polarização. A estrutura da FSS04 é uma combinação da FSS01 e FSS02. Para a polarização x, a Figura 4-7 mostra que a primeira ressonância é praticamente a mesma da FSS02, bem como, a segunda ressonância é a mesma da FSS01 (Tabela 02).

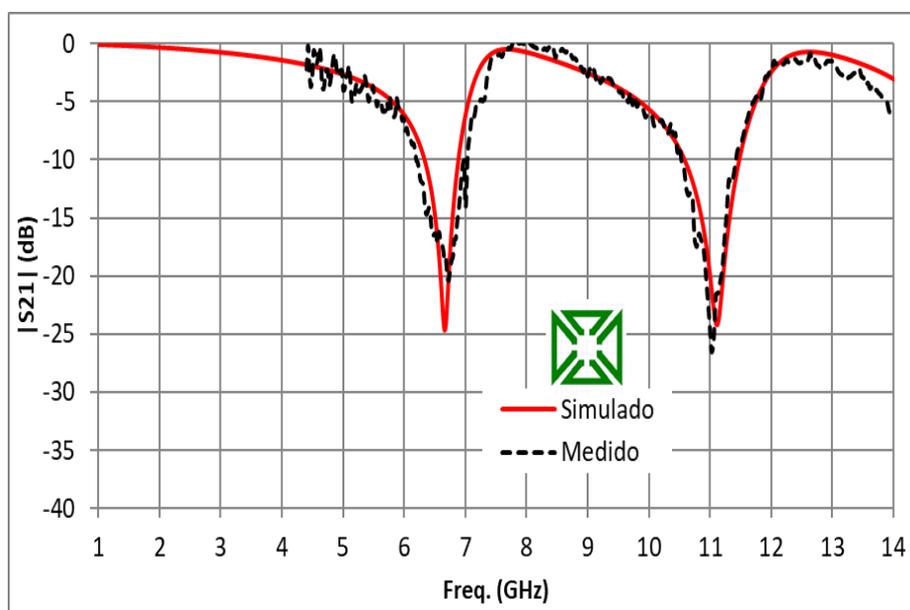


Figura 4-7 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), FSS04, pol. x.

Para a polarização y, a Figura 4-8, ilustra as ressonâncias trocadas quando comparadas à polarização x. A primeira ressonância é quase a mesma da FSS01 e a segunda é aproximadamente a mesma da FSS02, conforme Tabela 02.

Apesar da segunda frequência de ressonância ser observada ligeiramente nos resultados numéricos, ela é visível nos resultados medidos. Contudo, a resposta em frequência da FSS04 é muito interessante, destacando a flexibilidade no *design* da geometria proposta.

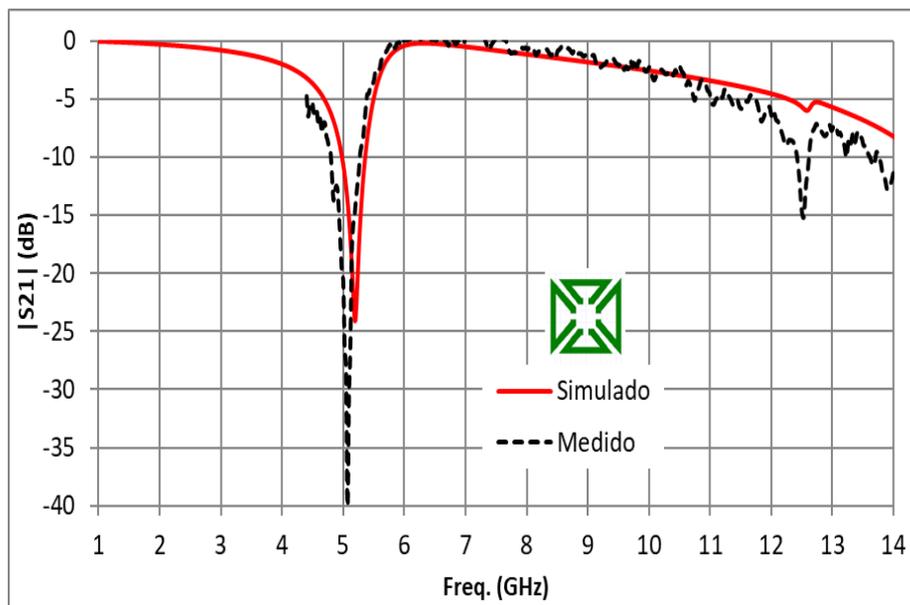


Figura 4-8 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) x Freq. (GHz), FSS04, pol. y.

Na Tabela 2 é apresentado um comparativo entre a primeira e a segunda frequência de ressonância, calculadas pelas equações (1) e (9) e as frequências obtidas com as simulações e medições. Com isso, observou-se que a diferença entre as frequências estimadas pelas equações iniciais de projeto e as obtidas nas simulações e medições apresentam uma pequena diferença, demonstrando assim que as equações são bem precisas nas estimativas da primeira e segunda frequências de ressonância.

Tabela 2 – Frequências ressonantes - FSS01, FSS02, FSS03 E FSS04.

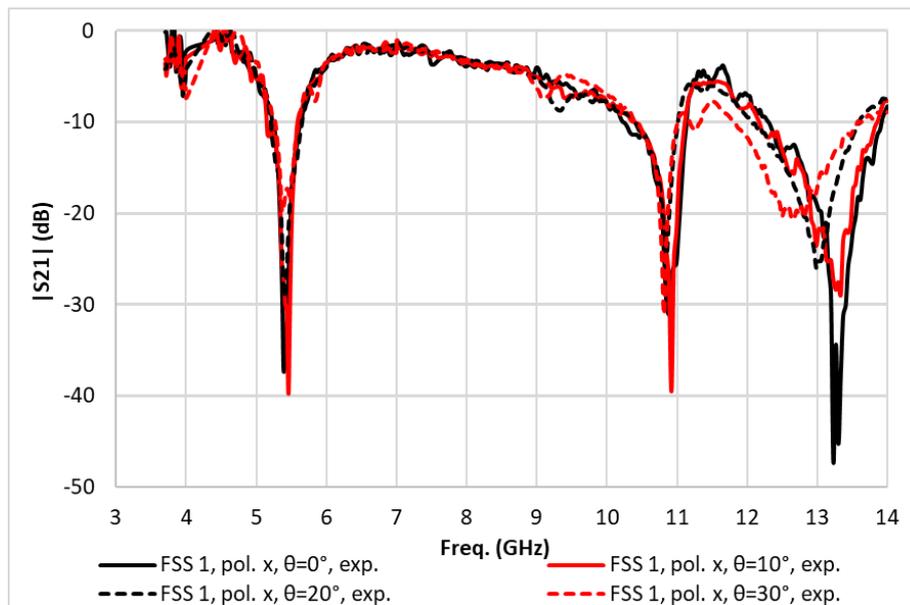
	FSS01	FSS02	FSS03	FSS04 pol. x/y
<i>fr1</i> (GHz), <i>medida</i>	5,16	6,4	5,92	6,72/5,07
<i>fr1</i> (GHz) simulada	5,16	6,77	5,86	6,66/5,20
<i>fr1</i> (GHz), Eq. (1)	5,37	6,88	5,77	6,88/5,37
<i>simulada /medida</i> (%)	0,0	0,4	1,0	0,9/2,6
<i>Eq.(1) /medida</i> (%)	4,1	2,1	2,5	2,4/5,9
<i>fr2</i> (GHz), <i>medida</i>	10,89	13,48	11,41	11,03/12,53
<i>fr2</i> (GHz), <i>simulada</i>	10,96	13,41	11,42	11,12/—
<i>fr2</i> (GHz), Eq. (9)	11,00	13,01	11,00	11,00/13,01
<i>simulada /medida</i> (%)	0,6	0,5	0,1	0,8/—
<i>Eq.(9) / medida</i> (%)	1,1	3,5	3,6	0,3/3,8

Foram realizadas medições e simulações das estruturas para diferentes ângulos de incidência da onda a fim de verificar a influência da variação angular nas respostas em frequência das FSS e assim verificar a estabilidade das mesmas.

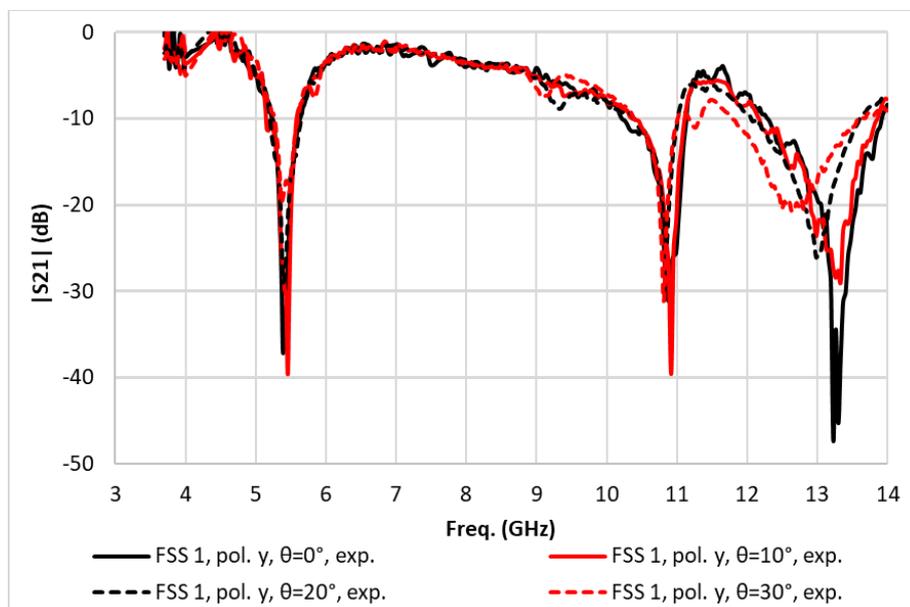
Os ângulos de incidências (θ) determinados nas análises numéricas e experimentais foram de 0° a 30° , isso decorreu em virtude do tamanho relativamente pequeno das FSS e da limitação proporcionado pelo *setup* de medição usado.

A seguir serão ilustrados todos os resultados obtidos nas análises numéricas e experimentais, bem como, o comparativo realizado entre eles para as quatro FSS analisadas neste trabalho.

A Figura 4-9 ilustra os resultados obtidos nas análises experimentais para as polarizações x e y da FSS01 com a variação angular de 0° a 30° .



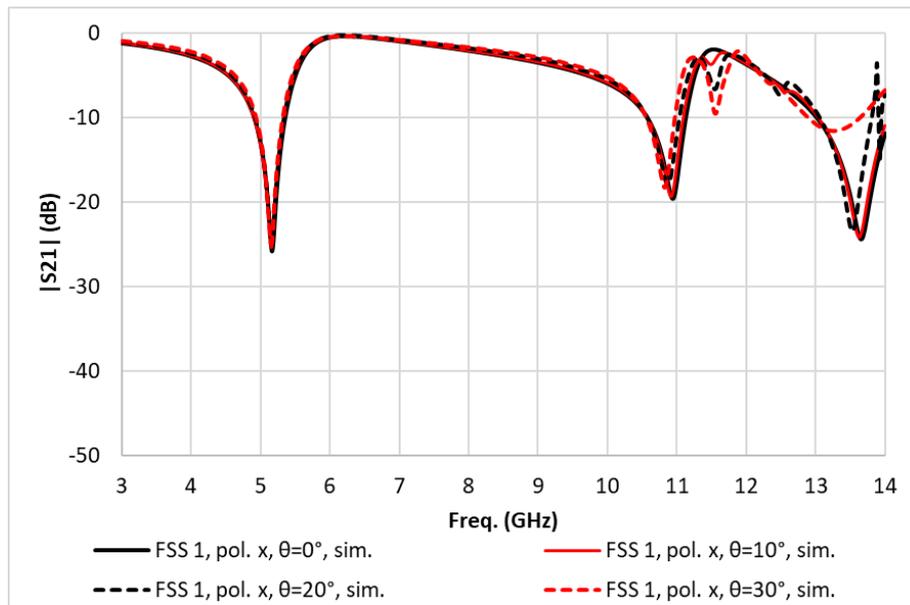
(a) pol. x, variação angular de 0° a 30° , medido.



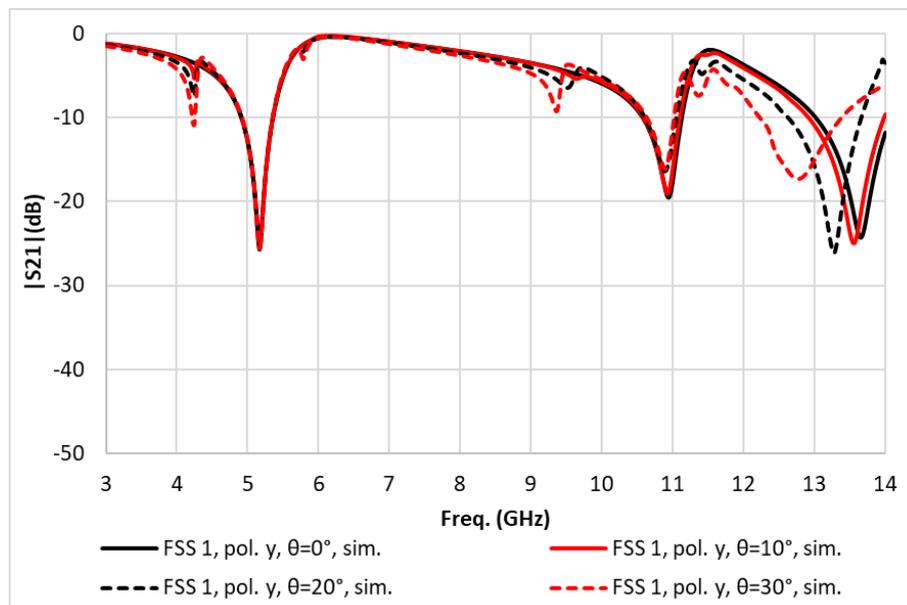
(b) pol. y, variação angular de 0° a 30° , medido.

Figura 4-9 - Resultados experimentais FSS01 variação angular de 0° a 30° .

A Figura 4-10 ilustra os resultados obtidos na análise numérica para as polarizações x e y da FSS01 com a variação angular de 0° a 30° .



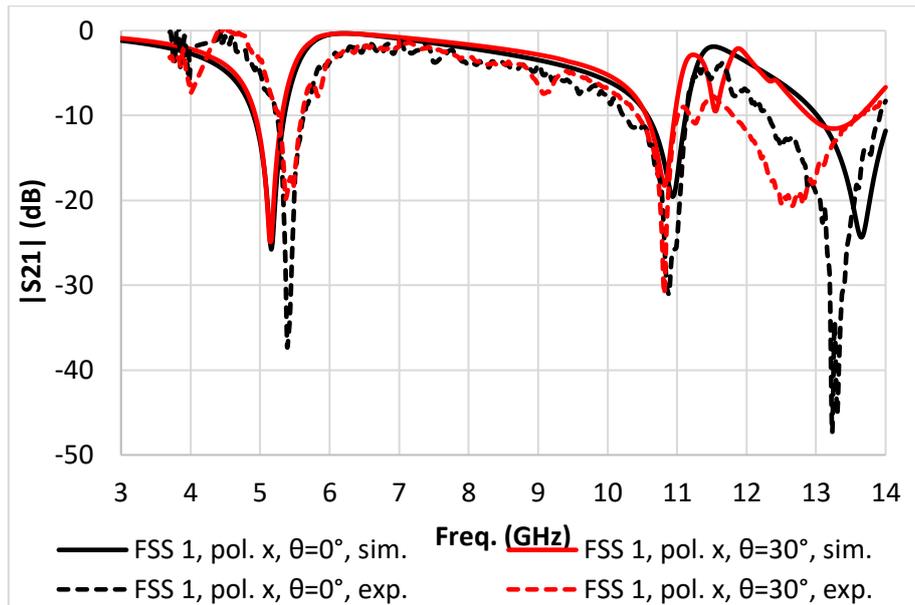
(a) pol. x, variação angular de 0° a 30° , simulado.



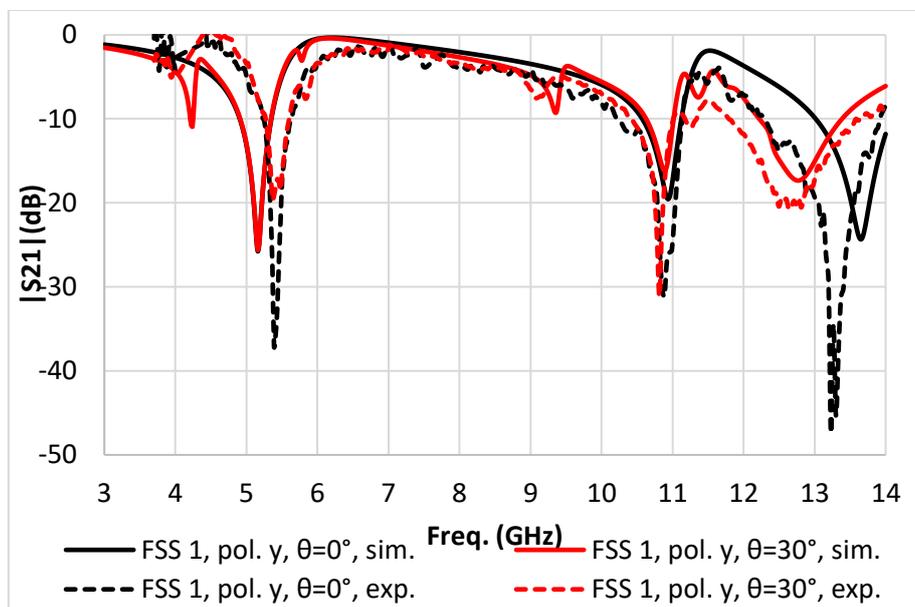
(b) pol. y, variação angular de 0° a 30° , simulado.

Figura 4-10 - Resultados numéricos FSS01 variação angular de 0° a 30° .

A Figura 4-11 ilustra a comparação dos resultados obtidos na análise numérica e experimental para as polarizações x e y da FSS01 com a variação angular de 0° e 30° .



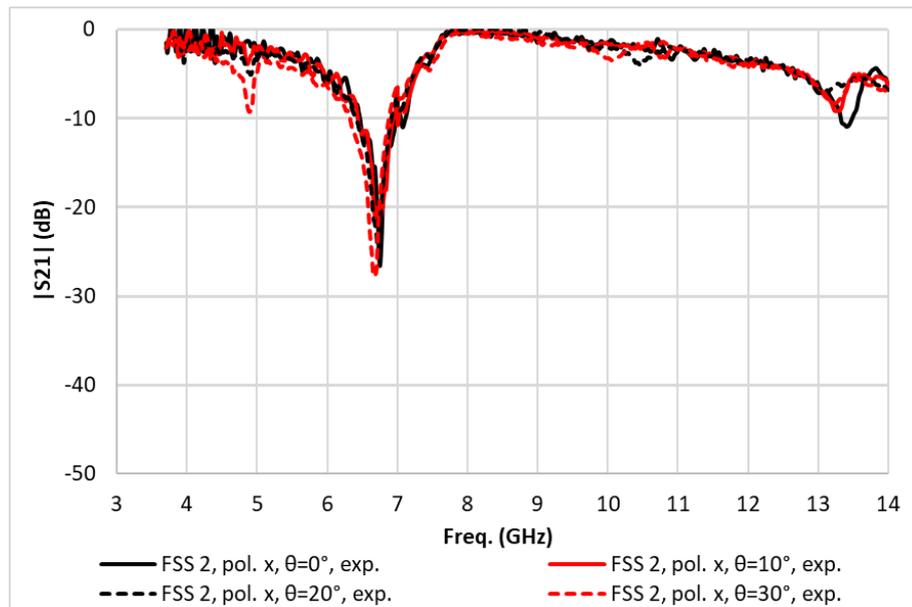
(a) resultados pol. x simulado e medido, variação angular de 0° e 30°



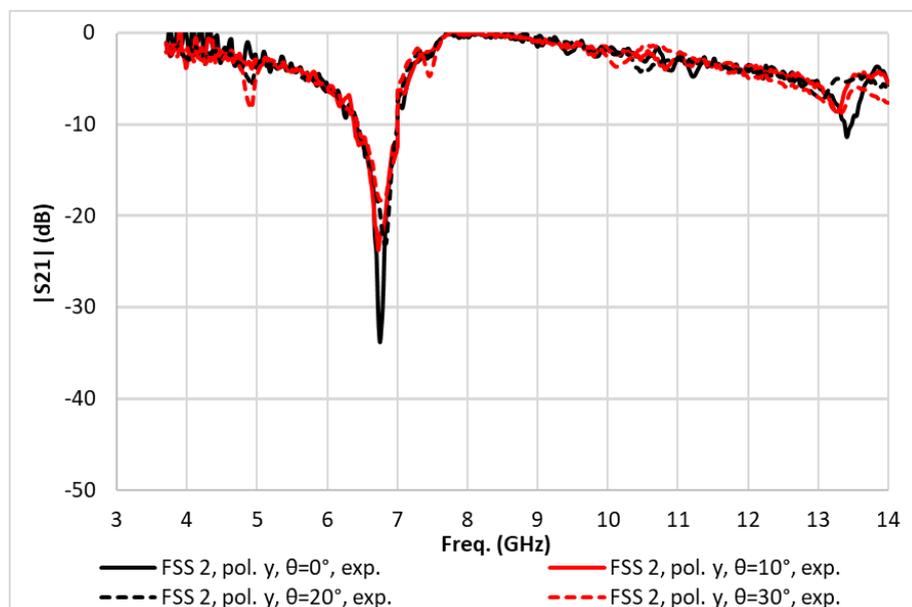
(b) resultados pol. y simulado e medido, variação angular de 0° e 30°

Figura 4-11 – Comparação dos resultados simulados e medidos da FSS01, variação angular de 0° e 30° para as polarizações x e y.

A Figura 4-12 ilustra os resultados obtidos nas análises experimentais para as polarizações x e y da FSS02 com a variação angular de 0° a 30° .



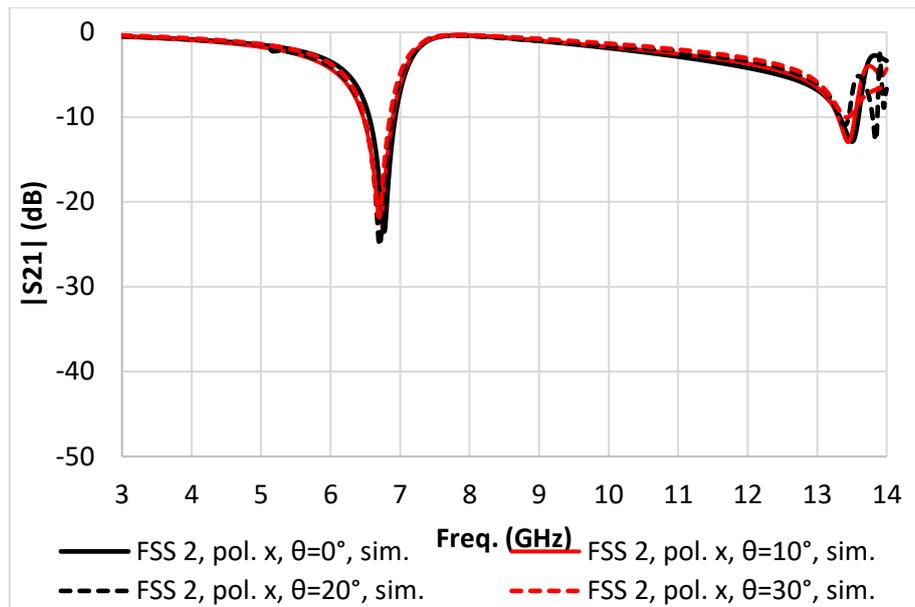
(a) pol. x, variação angular de 0° a 30° , medido.



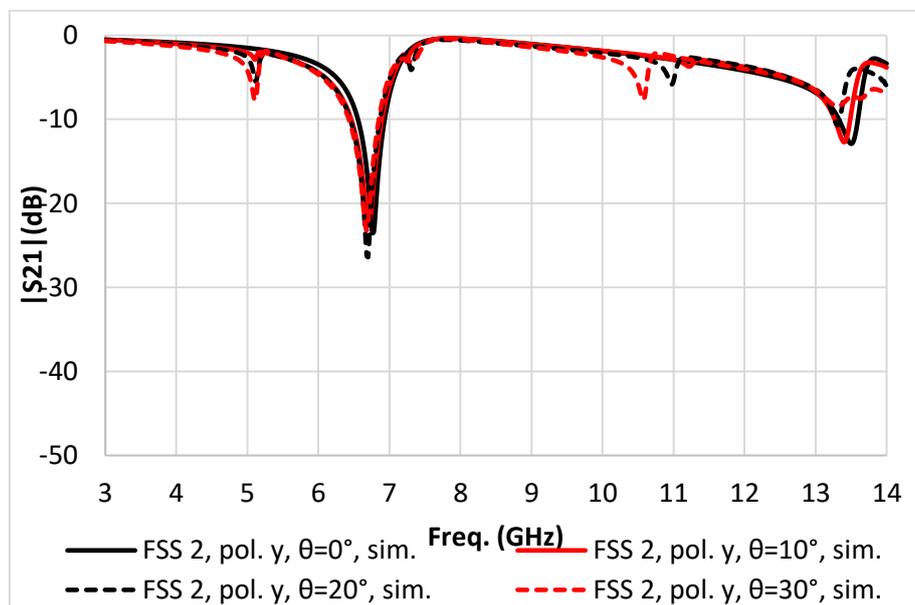
(b) pol. y, variação angular de 0° a 30° , medido.

Figura 4-12 - Resultados experimentais FSS02 variação angular de 0° a 30° .

A Figura 4-13 ilustra os resultados obtidos na análise numérica para as polarizações x e y da FSS02 com a variação angular de 0° a 30° .



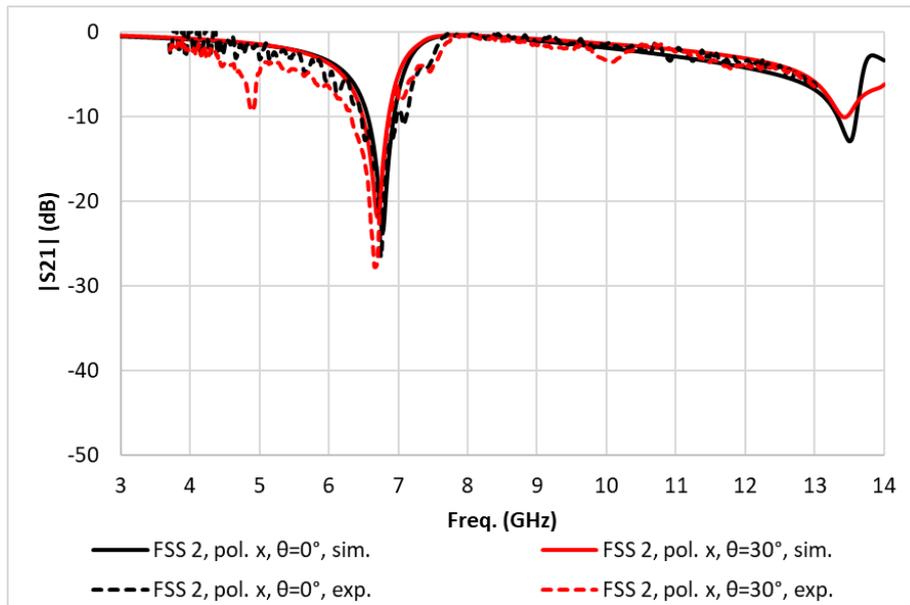
(a) pol. x, variação angular de 0° a 30° , simulado.



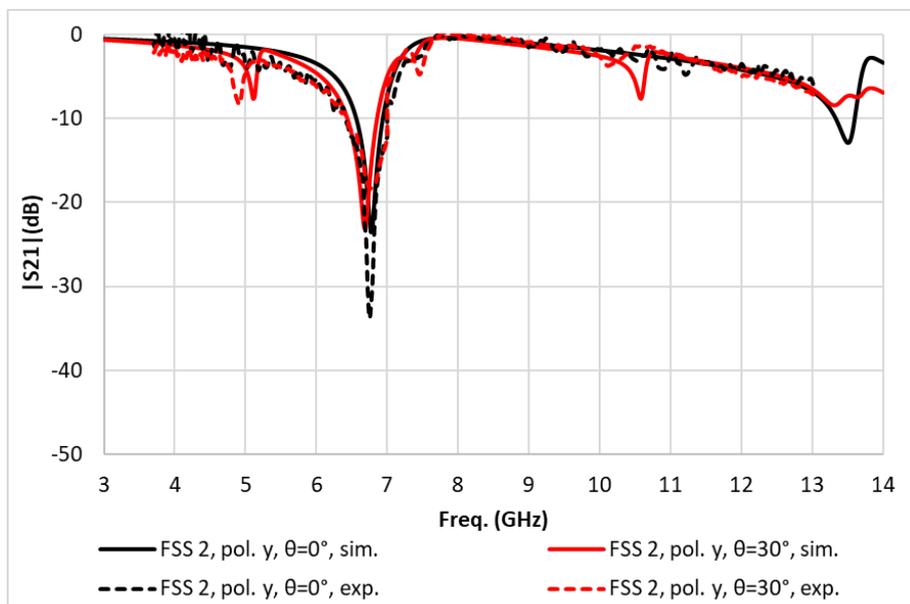
(b) pol. y, variação angular de 0° a 30° , simulado.

Figura 4-13 - Resultados numéricos FSS02 variação angular de 0° a 30° .

A Figura 4-14 ilustra a comparação dos resultados obtidos na análise numérica e experimental para as polarizações x e y da FSS02 com a variação angular de 0° e 30° .



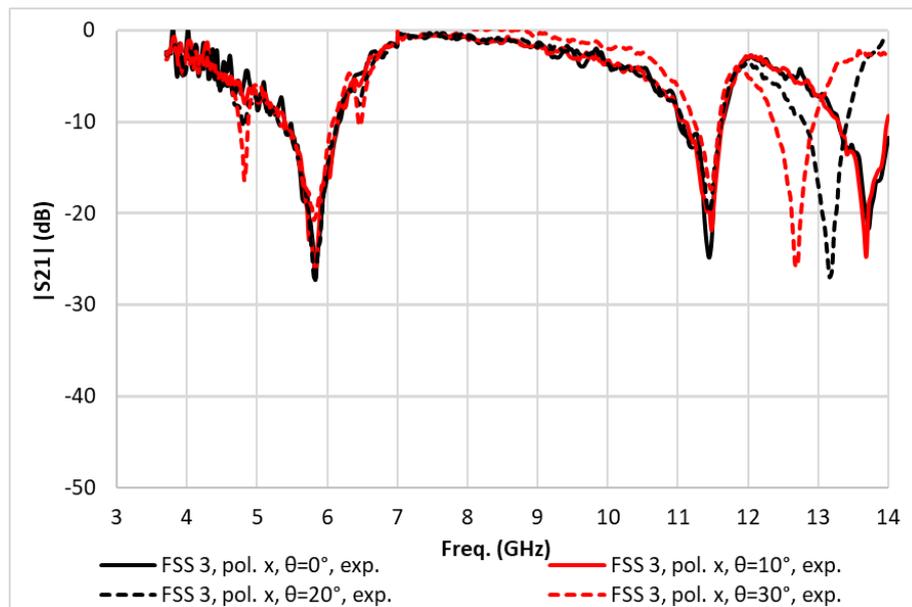
(a) resultados pol. x simulado e medido, variação angular de 0° e 30°



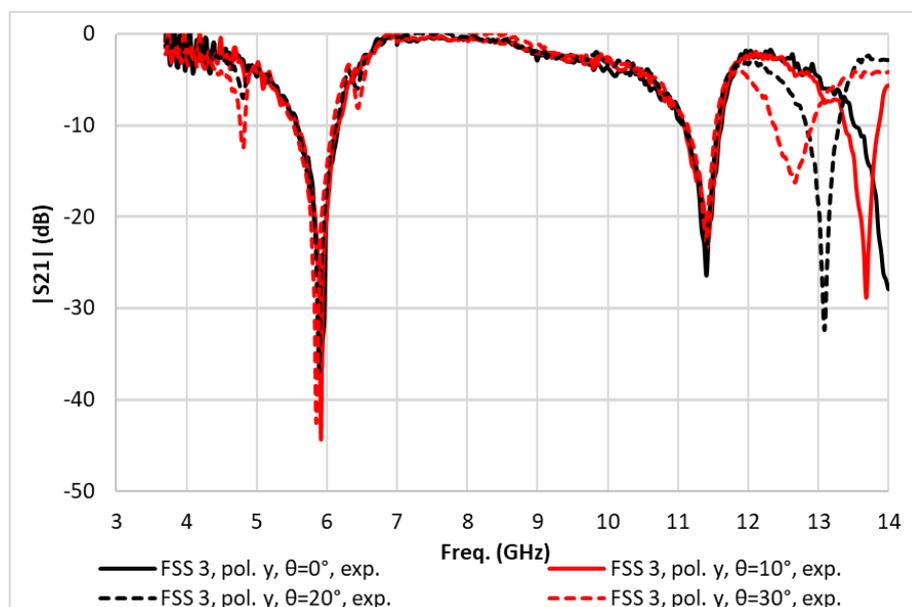
(b) resultados pol. y simulado e medido, variação angular de 0° e 30°

Figura 4-14 - Comparação dos resultados simulados e medidos da FSS02, variação angular de 0° e 30° para as polarizações x e y.

A Figura 4-15 ilustra os resultados obtidos nas análises experimentais para as polarizações x e y da FSS03 com a variação angular de 0° a 30° .



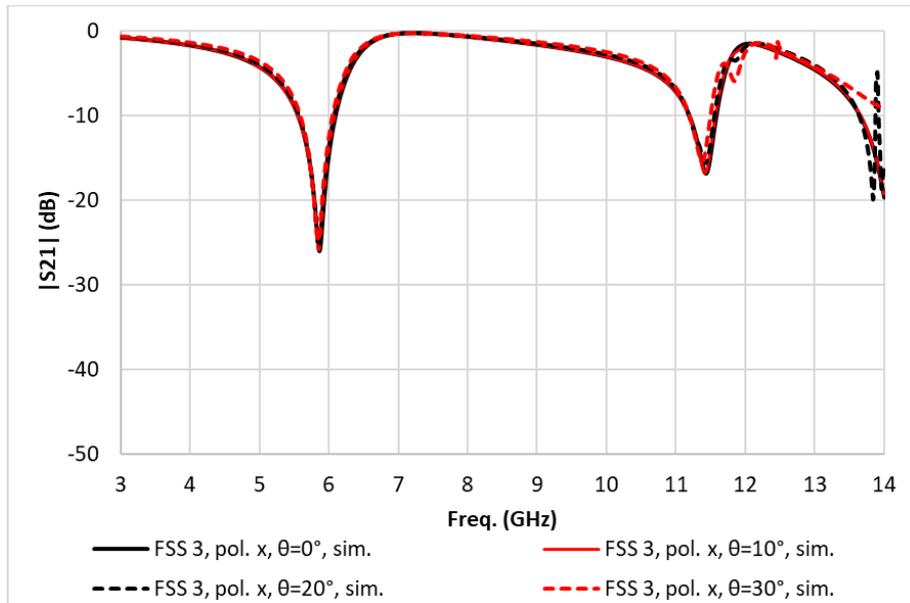
(a) pol. x, variação angular de 0° a 30° , medido.



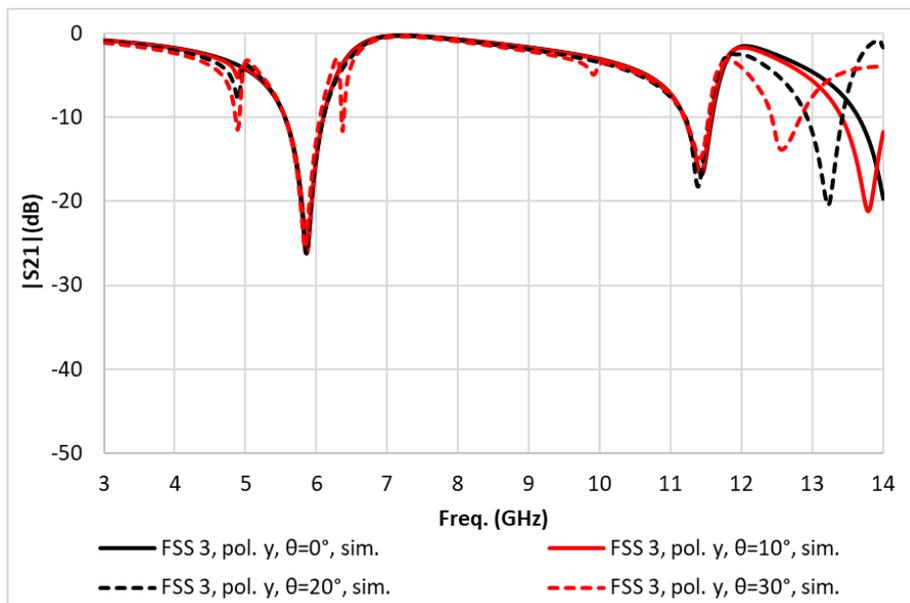
(b) pol. y, variação angular de 0° a 30° , medido.

Figura 4-15 - Resultados experimentais da FSS03 variação angular de 0° a 30° .

A Figura 4-16 ilustra os resultados obtidos na análise numérica para as polarizações x e y da FSS03 com a variação angular de 0° a 30° .



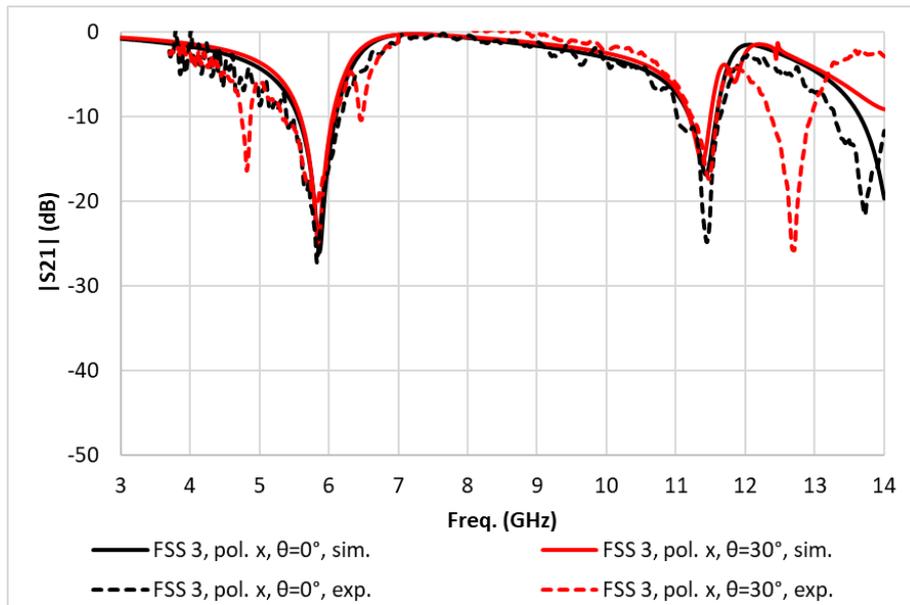
(a) pol. x, variação angular de 0° a 30° , simulado.



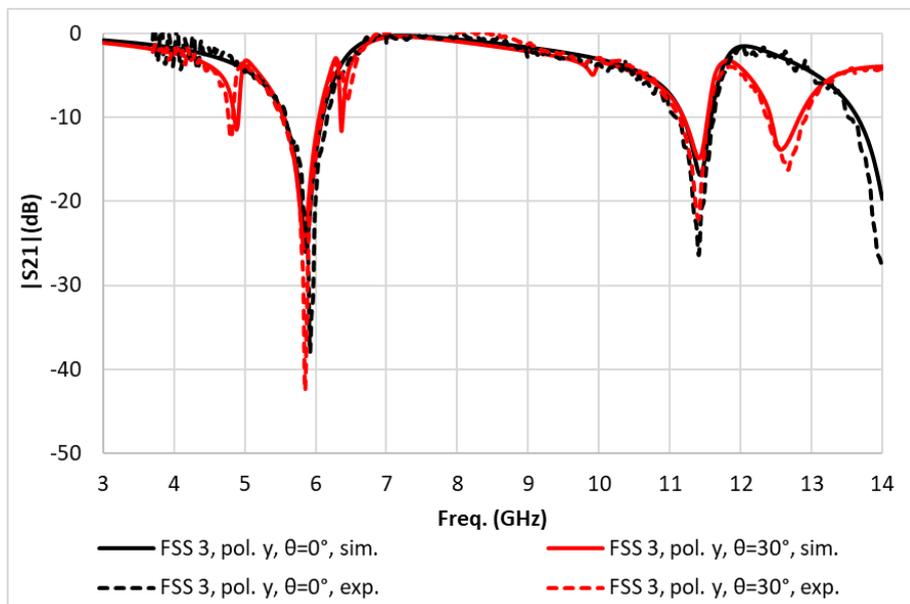
(b) pol. y, variação angular de 0° a 30° , simulado.

Figura 4-16 - Resultados numéricos FSS03 variação angular de 0° a 30° .

A Figura 4-17 ilustra a comparação dos resultados obtidos na análise numérica e experimental para as polarizações x e y da FSS03 com a variação angular de 0° e 30° .



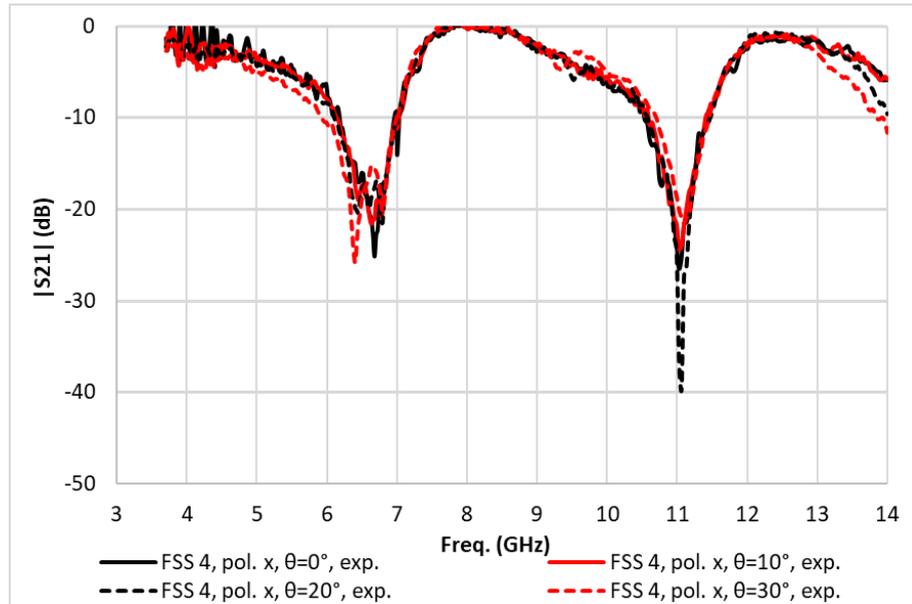
(a) resultados pol. x simulado e medido, variação angular de 0° e 30°



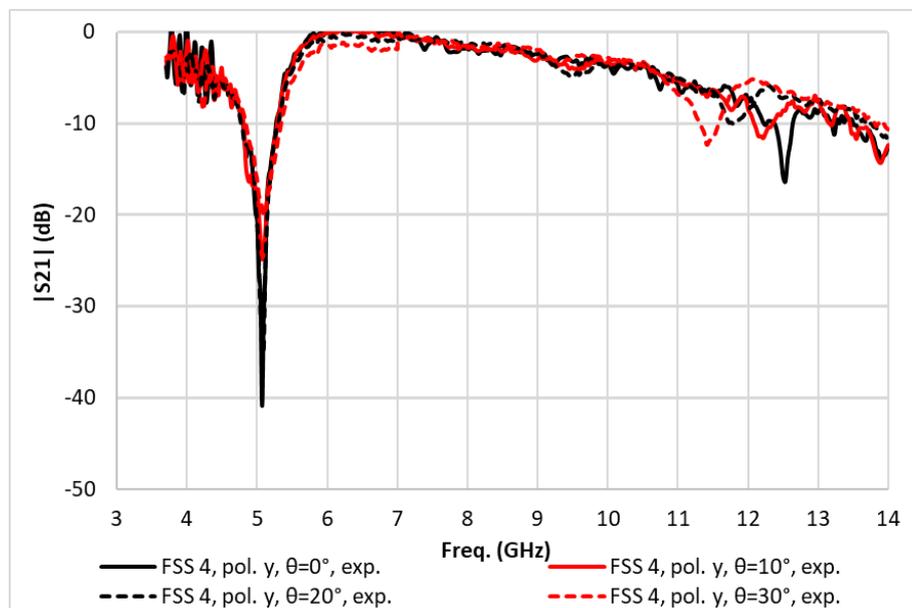
(b) resultados pol. y simulado e medido, variação angular de 0° e 30°

Figura 4-17 - Comparação dos resultados simulados e medidos da FSS03, variação angular de 0° e 30° para as polarizações x e y.

A Figura 4-18 ilustra os resultados obtidos nas análises experimentais para as polarizações x e y da FSS04 com a variação angular de 0° a 30° .



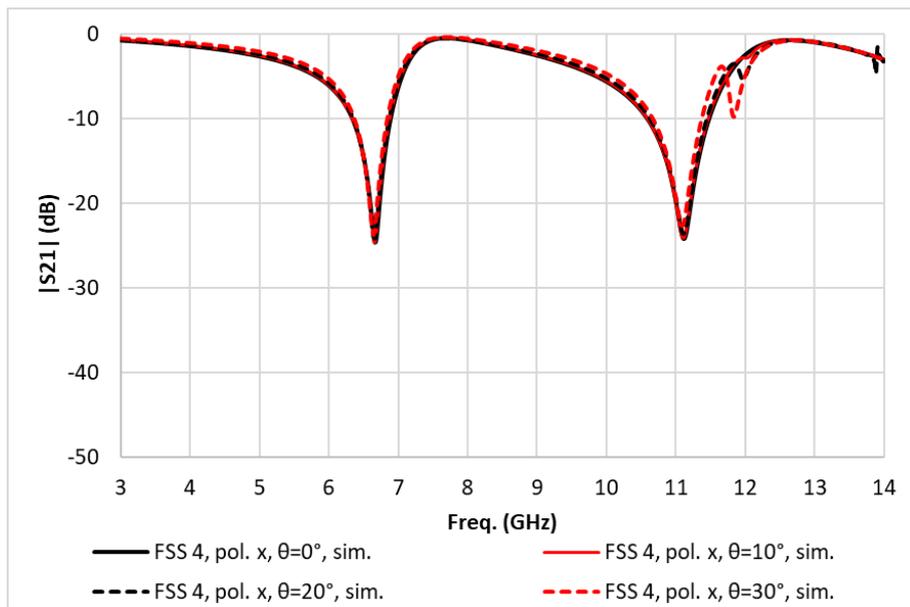
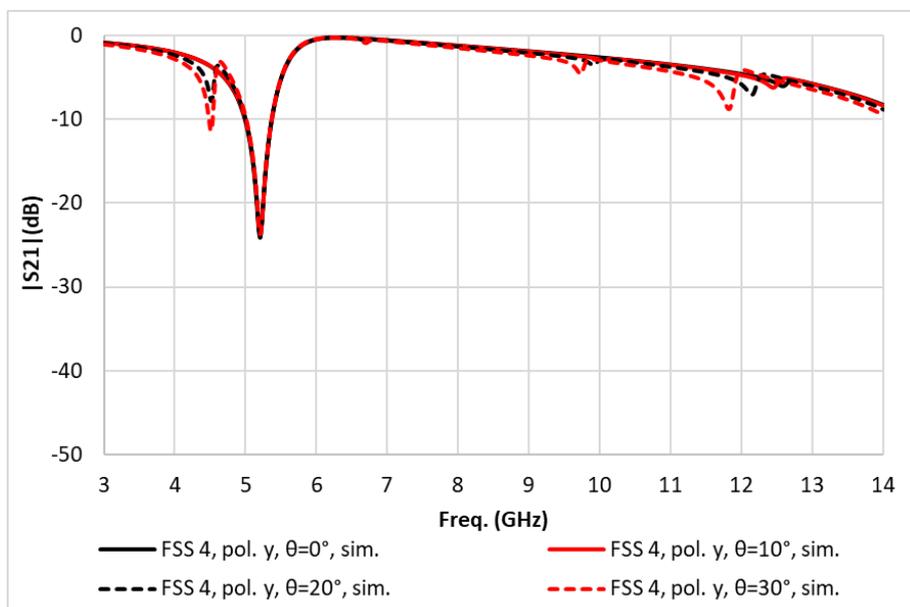
(a) pol. x, variação angular de 0° a 30°, medido



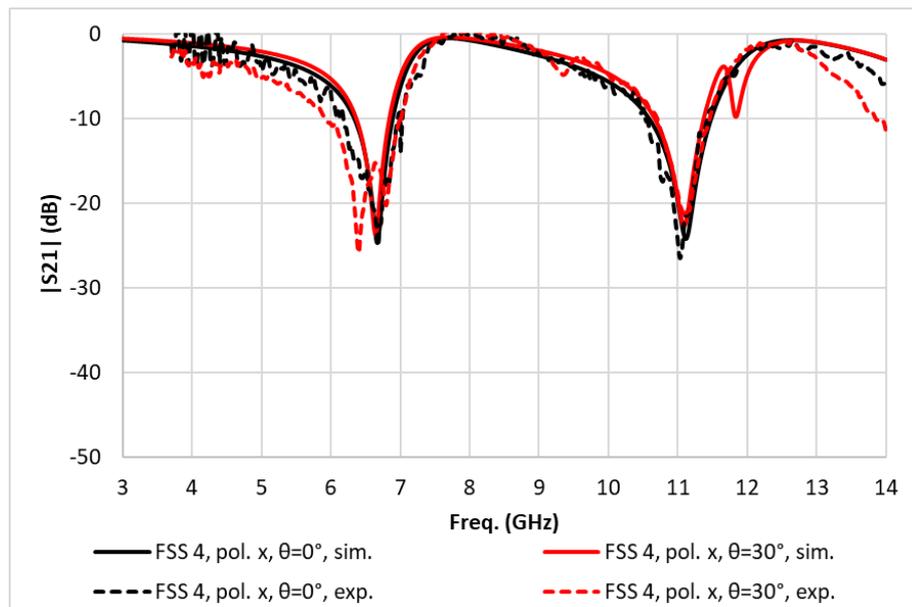
(b) pol. y, variação angular de 0° a 30°, medido

Figura 4-18 - Resultados experimentais da FSS04 variação angular de 0° a 30°.

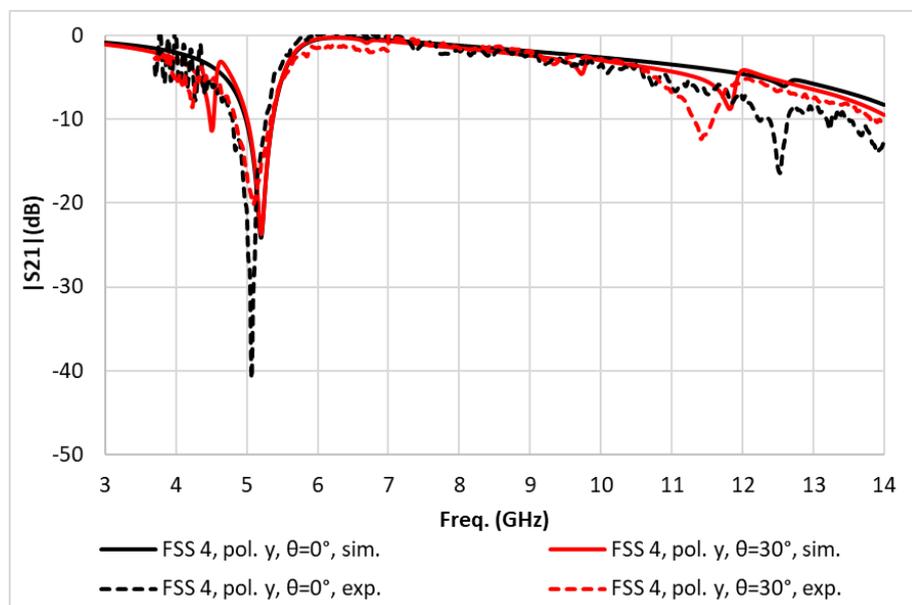
A Figura 4-19 ilustra os resultados obtidos na análise numérica para as polarizações x e y da FSS04 com a variação angular de 0° a 30°.

(a) pol. x, variação angular de 0° a 30° , simulado(b) pol. y, variação angular de 0° a 30° , simuladoFigura 4-19 - Resultados numéricos FSS04 variação angular de 0° a 30° .

A Figura 4-20 ilustra a comparação dos resultados obtidos na análise numérica e experimental para as polarizações x e y da FSS04 com a variação angular de 0° e 30° .



(a) resultados pol. x simulado e medido, variação angular de 0° e 30°



(b) resultados pol. y simulado e medido, variação angular de 0° e 30°

Figura 4-20 - Comparação dos resultados simulados e medidos da FSS04, variação angular de 0° e 30° para as polarizações x e y.

Com a variação do ângulo de incidência da onda, surgiram outras frequências de ressonância distintas da que foram analisadas inicialmente neste trabalho. No entanto, na faixa de interesse a frequência se manteve praticamente estável, não apresentando variações consideráveis em relação aos resultados obtidos sem a variação angular.

5. CONCLUSÃO

Esta dissertação teve por objetivo apresentar a caracterização de FSS baseada na geometria dos anéis trapezoidais abertos. A geometria foi descrita e suas respostas em frequência foram detalhadas, destacando os efeitos da polarização. Uma das características mais interessantes observadas no estudo foi a excitação dos anéis abertos trapezoidais em pares, permitindo ajustar de forma quase independente as respectivas frequências de ressonância.

Para calcular as duas primeiras frequências de ressonância, as equações iniciais do projeto são introduzidas com resultados muito bons, verificando uma diferença, quando comparada às medidas, menor que 6%.

Quatro FSS foram projetadas, considerando resultados numéricos, obtidos com a utilização do software ANSYS Designer, e experimentais, obtidos utilizando o analisador de redes Agilent E5071C, do Laboratório de Micro-ondas do GTEMA/IFPB.

Foram realizadas medições e simulações das estruturas para uma variação angular de 0° a 30° e verificou-se que a variações angulares usadas não alterou a faixa de interesse da frequência que se manteve praticamente estável aos resultados medidos inicialmente, sem a variação angular.

Observou-se uma excelente concordância nos resultados numéricos e experimentais obtidos.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para continuidade nesta dissertação, novas pesquisas podem ser desenvolvidas com base na utilização da geometria anéis trapezoidais abertos, podendo ser citada como por exemplo:

- FSS reconfiguráveis;
- Associar a geometria anéis trapezoidais abertos com novas geometrias para aplicação a edifícios eletromagnéticos inteligentes;
- Utilizar a FSS em aplicação de antenas inteligentes;

TRABALHOS PUBLICADOS

1. A. Gomes Neto, J. C. Silva, D.F. Mamedes, **J.d.S. Souza** e T.d.S. Evangelista, "Frequency Selective Surface Based on Open Trapezoidal Rings Geometry, " in *IMOC 2017*, Águas de Lindoia - SP, 2017.
2. A. Gomes Neto, J. C. Silva, **J.d.S. Souza**, M.O. Alencar e T.d.S. Evangelista "Desenvolvimento de uma FSS Banda Dupla para Aplicações em Paredes Inteligentes, " in *XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS (SBrT2017)*, São Pedro- (SP), 2017.
3. **J.d.S Souza**, A. Gomes Neto, J. C. Silva, T.d.S. Evangelista e M.O. Alencar, "Desenvolvimento de paredes inteligentes para aplicação em sistemas de comunicações sem fio nas faixas de 2,4 GHz e 5,8 GHz, " in *2º Simpósio de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação (Mostra Tecnológica - IFPB)*, João Pessoa, 2017.
4. **J.d.S Souza**, J. C. Silva, A. Gomes Neto, M.O. Alencar e T.d.S. Evangelista, "Análise de superfície seletiva em frequência baseada na geometria de anéis trapezoidais abertos, " in *2º Simpósio de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação*, João Pessoa, 2017.

REFERÊNCIAS

- [1] S. C. Vermelho, **Mídias e Linguagens**, Curitiba: IESDE, 2009.
- [2] M. L. Defleur, **Teorias da comunicação de massa**. Zahar, 1993.
- [3] I. Bragança, **Evolução das Comunicações**. Abrantes, Portugal: apostila, maio 2009.
- [4] A. F. Costella, **Comunicação: do Grito ao Satélite**, São Paulo: Editora Mantiqueira, 2011.
- [5] Teleco. Disponível em:
<<http://www.teleco.com.br/glossario.asp?termo=IEEE%20802.11>>. Acesso em 17 de julho de 2017.
- [6] R. M. Neto. **A Evolução dos Mecanismos de Segurança para Redes sem fio 802.11**, Rio de Janeiro: Trabalho de Conclusão de Curso, 2004.
- [7] A. Clegg e A. Weisshaar Eason. "Future radio spectrum access," *Proceedings of the IEEE*, v. 102, n. 3, pp. 239-241, 2014.
- [8] C. Zhang e W. Zhang. "Spectrum sharing for drone networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 35, n. 1, pp. 136-144, 2017.
- [9] J. Bae, E. Beigman, R. Berry, M. L. Honig, H. Shen, R. Vohra e H. Zhou. "Spectrum markets for wireless services," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2008. DySPAN 2008. 3rd IEEE Symposium on. IEEE*, 2008. pp. 1-10.
- [10] S. Riess, J. Brendel, A. Stoeckle, R. Rose e G. Fischer. "Components and implementation of a spectrum sensing network for the UHF TV band," in *Microwave Conference (EuMC), 2013 European. IEEE*, 2013. pp. 1091-1094.
- [11] M. Kitsunezuka; K. Kunihiro e M. Fukaiishi. "Efficient use of the spectrum,". *IEEE Microwave Magazine*, v. 13, n. 1, pp. 55-63, 2012.
- [12] A. Gomes Neto, , A. G. D'Assunção Junior, J. C. Silva, A. N.d. Silva, H. P. A.Ferreira e I. S.S. Lima. "A proposed geometry for multi-Resonant frequency selective surfaces," in *European Microwave Week 2014 Conference/44th European Microwave Conference (EuMC), European Microwave*, Roma, 2014, pp. 897-900.
- [13] I. S. S. Lima, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de Estrela de Quatro Braços**: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [14] L. C. M.d. Moura, **Caracterização de FSS com Geometria Estrela de Quatro Braços tipo Fenda**: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2016.

- [15] I. Ullah, X. Zhao, D. Habibi e G. Kiani. "Transmission improvement of UMTS and Wi-Fi signals through energy saving glass using FSS," in *Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2011 IEEE 12th Annual*. IEEE, 2011. pp. 1-5.
- [16] T. K. Wu, **Frequency-Selective Surface and Grid Array**, Wiley, New York, 1995.
- [17] A. L. P. S. CAMPOS, **Superfícies Seletivas em Frequência – Análise e Projeto**, Natal-RN, IFRN Editora, 2009.
- [18] J.d. N. Cruz, **Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [19] A. N. d. Silva, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de U**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2016.
- [20] J. B. d. O. Silva, **Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequência com Banda Dupla de Operação Baseadas na Geometria Estrela de Quatro Braços Associada a Anéis Trapezoidais**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2016.
- [21] J. C. Vardaxoglou, **Frequency Selective Surfaces – Analysis and Design, Research Studies Press**, England, 1997.
- [22] A. Monorchio, G. Manara, U. Serra, G. Marola, E. Pagana, "Design of waveguide filters by using genetically optimized frequency selective surfaces," *Microwave and Wireless Components Letters*, IEEE, vol.15, no.6, June 2005, pp. 407- 409.
- [23] A. Edalati, T. A. Denidni, "Frequency selective surfaces for beam-switching applications," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 61, nº 1, 2013, pp. 195-2013.
- [24] J. Romeu e Y. Rahmat-Samii. "Fractal FSS: A novel dual-band frequency selective surface,". *IEEE Transactions on antennas and propagation*, v. 48, n. 7, p. 1097-1105, 2000.
- [25] B. A. Munk, **Frequency Selective Surfaces – Theory and Design**, Wiley, 2000.
- [26] R. Dickie, R. Cahill, V. Fusco, H. S. Gamble and N. Mitchell, "THz frequency selective surface filters for Earth observation remote sensing instruments," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 1, nº 2, 2011, pp. 450-461.
- [27] HOPKINSON, Francis; RITTENHOUSE, David. "An optical problem, proposed by Mr. Hopkinson, and solved by Mr. Rittenhouse,". *Transactions of the American Philosophical Society*, v. 2, pp. 201-206, 1786.

- [28] T. K. Chang, R. J. Langley e A. Parker, "Active frequency selective surfaces," *IEEE Proceedings on Antennas and Propagation*, vol. 143, pp. 62-66, March 1996.
- [29] A. N. Silva, **Análise dos Campos Eletromagnéticos de FSS com Geometria Fractal**, João Pessoa: Trabalho de Conclusão de Curso, 2012.
- [30] A. G. Neto, J. N. Carvalho, A. N.d. Silva, H.d. P. A. Ferreira, I. S. S. Lima e J. I. Fernandes, "Four Arms Star: An Useful Geometry for Switchable FSS, " in *International Microwave and Optoelectronics Conference*, Rio de Janeiro, 2013
- [31] J. P. d. L. R. Nieremberg, **Caracterização de Antena Tipo Refletor de Canto Utilizando Superfícies Seletivas em Frequência**: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2016.
- [32] E. C. Braz. **Análise de Superfície Seletiva em Frequência com Geometrias Multifractais**,: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, Tese de Doutorado, 2014.
- [33] R. Mittra, C. H. Chan, and T. Cwik, "Techniques for analyzing frequency selective surfaces – a review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 12, pp. 1593-1615, Agosto, 1988.
- [34] A. Gomes Neto, A. G. D'Assunção Junior, J. C. Silva, J. do N. Cruz, J. B. d. O. Silva e N. J. P. d. L. Ramos, "Multiband frequency selective surface with open matryoshka elements," in *9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisboa, Portugal, 13–17 April, 2015, pp. 1–6.
- [35] M. Raspopoulos e S. Stravou, "Frequency selective buildings through frequency selective surfaces," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 59, pp. 2998-3005, 2011.
- [36] F. Bayatpur, **Metamaterial-Inspired Frequency-Selective Surfaces**. The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, EUA , Dissertation, 2009.
- [37] P. C. Kim, W. S. Chin, D. G. Lee e I. S. Seo, "EM characteristics of the RAS composed of E-glass/epoxy composite and single dipole FSS element," *Composite Structures*, vol. 75, pp. 601-609, 2006.
- [38] X. Li e J. Yun-Feng, "Analysis on transmission properties of Ka waveband frequency selective surface," in *Microwave Conference Proceedings (CJMW)*, Hangzhou, April 2011.
- [39] A. L. P. S. Campos, "Estudo da flexibilidade de projeto de superfícies seletivas em frequência, " in *Anais do II CONNEPI*, João Pessoa, 2007.
- [40] A. F. Santos, M. M. Barbosa; P. H. F. Silva, R.M. S Cruz, "Análise e projeto de superfícies seletivas em frequência utilizando a geometria fractal de Gosper, " in *Anais do V CONNEPI*, Maceió, 2010.

- [41] A. L. P. S. Campos, E. E. C. Oliveira e P. H. F. Silva, "Design of miniaturized frequency selective surfaces using Minkowski Island fractal," *Journal of Microwaves, Opt. Electromagnetic Applications*, vol. 9, no. 1, pp.43-49, 2010.
- [42] F. Huang, J.C. Batchelor e E. A. Batchelor, "Interwoven convoluted element frequency selective surfaces with wide bandwidths," *Electronics Letters*, v. 42, n. 14, pp. 788-790, 2006.
- [43] E. A. Parker e A. N. A. El Sheikh. "Convoluted dipole array elements," *Electronics letters*, v. 27, n. 4, pp. 322-323, 1991.
- [44] F. C. G.d.S. Segundo, **Análise e projeto de superfícies seletivas em frequência multibanda e/ou banda larga**,: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [45] B. Sanz-Izquierdo, A. Edward, J.B. R. Parker e J.C. Batchelor, "Singly and dual polarized convoluted frequency selective structures," *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, v. 58, n. 3, p. 690-696, 2010.
- [46] L. M. Araújo, R.H. C. Maniçoba, A.L.P.S. Campos e A. G. D'Assunção. " A simple dual-band frequency selective surface," *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 51, n. 4, pp. 942-944, 2009.
- [47] T.d. L. Silva, **Análise de onda completa de superfície seletiva em frequência do tipo anteparo duplo**,: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2011.
- [48] W. C. Gibson. **The method of Moments in Electromagnetics**, New York: Chapman & Hall /CRC, 2008.
- [49] 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," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 28, pp. 53-62, 2012.
- [50] D. B. Webb, E. Michielssen, e R. Mittn, "Thick frequency selective surfaces," *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1992. AP-S. 1992 Digest. Held in Conjunction with: URSI Radio Science Meeting and Nuclear EMP Meeting, IEEE*, pp. 1795-1798 vol. 4, 18-25 June 1992.
- [51] A. P. Costa, **Implementação de uma Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços**,: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2016.
- [52] S. N. Azemi, K. Ghorbani e W. S. T. Rowe, " Mechanically Tunable and Reconfigurable FSS using Spring Loaded Ring Resonators," *Microwave Conference (EuMC), 2013 European, Nuremberg*, pp. 932-935, 2013.

[53] B. Sanz-Izquierdo e E. Parker, "Dual polarized reconfigurable frequency selective surfaces," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 62, n. 2, pp.764-771, 2014.

[54] V. F. d. Barros, **Aplicação de curvas fractais em elementos convolucionados para o projeto de FSS miniaturizada e com estabilidade angular**,: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, Tese de Doutorado, 2017.

[55] P. C. K, D.G. Lee, I.S. Seo e G.H.Kim. "Low-observable radomes composed of composite sandwich constructions and frequency selective surfaces," *Composites Science and Technology*, v. 68, n. 9, p. 2163-2170, 2008.

[56] M. Gustafsson, A. Karlsson, A.P.P. Rebelo e B. Widenberg "Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 54, n. 6, pp. 1897-1900, 2006.

[57] L. Subrt, P. Pechac, A. Vallecchi, L. Ford, R. Langley, J. Rigelsford. "Advanced Modelling of Intelligent Walls for Indoor Smart Environments," in: *Antennas and Propagation (EuCAP), 2014 8th European Conference on*. IEEE, pp. 620-622, 2014

[58] G. I. Kiani, K.L. Ford, L. G. Olsson, K.P. Esselle e C. J. Panagamuwa. "Switchable frequency selective surface for reconfigurable electromagnetic architecture of buildings," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 58, n. 2, p. 581-584, 2010.

[59] J. Roberts, K. L. Ford, J. M. Rigelsford, "Secure electromagnetic buildings," in *Antennas and Propagation (EuCAP), 2014 8th European Conference on*. IEEE, pp. 797-798, 2014.

[60] I. Ullah, D. Habibi, X. Zhao e G. Kiani, "Design of RF/Microwave efficient buildings using frequency selective surface," in *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on*. IEEE, pp. 2070-2074, 2011.

[61] A. Gomes Neto, J.C. Silva, J. d. S. Souza, M.d.O. Alencar e T.d.S. Evangelista, "Desenvolvimento de uma FSS Banda Dupla para Aplicações em Paredes Inteligentes," in *XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS (SBRT2017)*, São Pedro (SP), pp.67-71, 2017.

[62] S. D. Jang, B. W. Kang, J. Kim, "Frequency selective surface based passive wireless sensor for structural health monitoring," *Smart Materials and Structures*, nº 22, pp. 1-7, 2013.

[63] S. Shrestha, M. Balachandran, M. Agarwal, V. V. Phoha, K. Varahramyan, "A chipless RFID sensor system for cyber centric monitoring applications," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, nº 5, pp. 1303-1309, 2009.

- [64] E. d. S. R. Montalvão. **Uma Proposta de FSS Fractal com Geometria Simplificada**, : Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2010.
- [65] R. Dubrovka, J. Vazquez, C. Parini e D. Moore, "Equivalent circuit method for analysis and synthesis of frequency selective surfaces," *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings*, v.153, n. 3, pp. 213-220, 2006.
- [66] A. Fallahi, M. Mishrikey, C. Hafner e R. Vahldieck, "Efficient procedures for the optimization of frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 56, n. 5, pp. 1340-1349, 2008.
- [67] R. G. G.d. Carvalho, **Desenvolvimento de FSS mecanicamente reconfigurável para aplicações em micro-ondas**, : Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, Dissertação de Mestrado 2017.
- [68] C.C. Chen, "Transmission of microwave through perforated flat plates of finite thickness," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, v.21, nº 1, pp. 1-6, 1973.
- [69] A. F. d. Santos, **Desenvolvimento teórico e experimental de FSS com elementos fractais de Gosper em estruturas de multicamadas**, : Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, Dissertação de Mestrado 2013.
- [70] T. Itoh, G. Pelosi e P. P. Silvester, **Finite Element Software for Microwave Engineering**, New York: Wiley, 1996.
- [71] J. L Volaskis, A. Chatterjee e L. C. Kempel, **Finite Element Method for Electromanetics, Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications**, Florida, USA: Wiley-IEEE Press, 1998.
- [72] P. Harms, R. Mittra e W. Ko, "Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, pp. 1317-1324, 1994.
- [73] N. Kaneda, B. Houshmand e T. Itoh, "FDTD analysis of dielectric resonators with curved surfaces," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 45, pp. 1645-1649, 1997.
- [74] M. Titaouine, A. G. Neto, H. Baudrand, e F. Djahli, "WCIP method applied to active frequency selective surfaces," *Journal of Microwaves*, v. 6, pp. 1-16, 2007.
- [75] M. Titaouine, N. Raveu, A. G. Neto, and H. Baudrand, "The WCIP method: Theory and applications," *Advances in Engineering Research*, v. 6, pp. 143-176, 2008.
- [76] R. Simons, **Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems**, USA: Wiley, 2001.

[77] RF Wireless World. **CPW (Coplanar Waveguide) Basics**. Disponível em: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/CPW-Coplanar-Waveguide-basics.html>>. Acesso em: 18 out.2017.

[78] AppCAD. Disponível em : < <http://www.hp.woodshot.com/>>. Acesso em: 06 out.2017.

[79] MICROWAVES101.COM. **Coplanar Waveguide Calculator**. Disponível em: <<https://www.microwaves101.com/calculators/864-coplanar-waveguide-calculator>>. Acesso em: 06 out. 2017.

[80] Ansys. Disponível em: < <http://www.ansys.com>>. Acesso em: 06 out.2017.