



João Batista de Oliveira Silva

**DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM
FREQUÊNCIA COM BANDA DUPLA DE OPERAÇÃO
BASEADAS NA GEOMETRIA ESTRELA DE QUATRO
BRAÇOS ASSOCIADA A ANÉIS TRAPEZOIDAIS**

João Pessoa - PB
Outubro de 2016



João Batista de Oliveira Silva

**DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM
FREQUÊNCIA COM BANDA DUPLA DE OPERAÇÃO
BASEADAS NA GEOMETRIA ESTRELA DE QUATRO
BRAÇOS ASSOCIADA A ANÉIS TRAPEZOIDAIS**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Alfrêdo Gomes Neto, Dr.
Orientador

João Pessoa – PB
outubro de 2016

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

| | |
|-------|--|
| S586d | Silva, João Batista de Oliveira. Desenvolvimento de superfícies seletivas em frequência com banda dupla de operação baseadas na geometria estrela de quatro braços associadas a anéis trapezoidais / João Batista de Oliveira Silva. – 2016. 66 f. : il. Dissertação (Mestrado - Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba / Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016. Orientação : D.r Alfrêdo Gomes Neto. 1. FSS. 2. Geometria estrela de quatro braços. 3. Anéis trapezoidais. 4. Banda dupla de operação I. Título CDU 621.39(043) |
|-------|--|

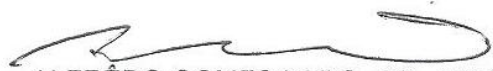
João Batista de Oliveira Silva


**DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM
FREQUÊNCIA COM BANDA DUPLA DE OPERAÇÃO
BASEADAS NA GEOMETRIA ESTRELA DE QUATRO
BRAÇOS ASSOCIADA A ANÉIS TRAPEZOIDAIS**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

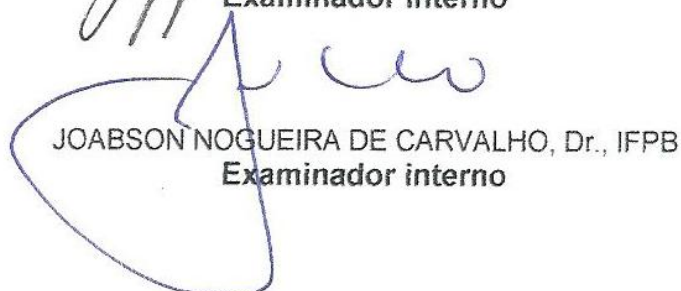
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 13/10/2016.

BANCA EXAMINADORA


ALFRÉDO GOMES NETO, DR., IFPB
Orientador


ALEX JEAN RENÉ SERRES, PhD., UFCG
Examinador externo


JEFFERSON COSTA E SILVA, DR., IFPB
Examinador interno


JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO, Dr., IFPB
Examinador interno

João Pessoa – PB
Outubro de 2016

Ao meu amigo Prof. Dr. Paulo de Tarso Costa Henriques, pelas inúmeras vezes que me chamou a atenção, para que um dia concretizasse o meu projeto de mestrado, que em algumas vezes foi interrompido por encargos ou missões na gestão do IFPB.

Cheguei meu amigo e, sem pensar em tempo perdido, pois saiba que valeu muito os seus ensinamentos no nosso convívio diário, sobre Metodologia da Pesquisa Científica, além das diversas orientações sobre planejamento, onde o seu próprio exemplo de vida no sentido de servir e de perseverança, sem dúvida, iluminou-me bastante nos momentos da obscuridade da dúvida e levou-me a esta glória alcançada. Muito obrigado, amigo! DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus que na sua infinita bondade e graça deu-me a oportunidade de reencontrar-me como aluno nesta querida Instituição para cursar outra pós-graduação, desta vez, vivendo uma situação de ter os colegas de trabalho como mestres e, a forte emoção de contar com um Ex-aluno, como professor e orientador do meu trabalho de dissertação. Glória a Ti rendemos Senhor, pela luz e força para superar trevas e montanhas no caminho do saber.

Também agradeço a minha família, em especial a minha querida esposa Maria Gorette e, meus filhos Jean, Jeanne, Jeanine, e as netinhas Marina e Letícia, razões da minha existência que compreenderam a minha ausência durante os estudos e pesquisas e que sempre me estimularam nos momentos de aflição. Agradeço aos meus pais Severino Januário (*in memoriam*) e Domerina de Oliveira, fonte de amor e bondade que até hoje se dedica à minha formação, até porque na condição de modesta educação propedêutica, entendem que um professor é um eterno aprendiz. A minha querida sogra Ana Ninô, que nos deixou recentemente e muito contribuiu com o seu apoio moral, irmãos, amigos e colegas de trabalho, que sempre acreditaram e apoiaram o meu desenvolvimento acadêmico.

Agradeço aos colegas do mestrado, em especial Andrécia Pereira e Maciel Oliveira pelo companheirismo e apoio nos momentos de trabalho e pesquisa. Porém, de uma forma geral foi possível perceber o espírito de solidariedade e cooperação mútua num ambiente acadêmico, digo, o Mestrado em Engenharia Elétrica do IFPB, de alto nível, onde professores e alunos estão muito próximos e, interagem harmonicamente numa relação pedagógica no estilo côncavo e convexo. Faz-se necessário ressaltar os meus mais sinceros agradecimentos ao competente Prof.Dr. Alfredo Gomes Neto, fonte de humanidade e humildade, como incentivador e acreditador, apesar das minhas incertezas circunstanciais de que tal desiderato seria possível. Muito obrigado pela sua confiança e apoio logístico, aliás, condição essencial para a concretização de um sonho. Amigo, você me fez renascer academicamente e despertado para outros desafios. Muito obrigado!

“A fé significa crença no desconhecido, a serena convicção de que, embora você não possa imaginar como, em algum momento, em algum lugar, e da maneira correta, aquilo que você deseja irá acontecer.”

Daphne Rose Kingma

RESUMO

A principal finalidade das telecomunicações é suprir a necessidade humana de se comunicar à distância. Ultimamente, devido ao intenso crescimento de aplicações que utilizam os sistemas de telecomunicações, a demanda de disponibilidade de bandas de frequência do espectro eletromagnético tem se tornado cada vez maior, gerando necessidades de novas tecnologias para suprir estes requisitos específicos tanto de resposta em frequência, como níveis de potência. Neste contexto, as FSS vêm recebendo a atenção de diversos grupos de pesquisa, pois podem desempenhar um papel fundamental na otimização de circuitos e antenas. Neste trabalho, é proposto o desenvolvimento de superfícies seletivas em frequência com banda dupla de operação, baseadas na geometria, estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais. Inicialmente, as características de cada geometria são analisadas separadamente. Em seguida, discute-se o efeito da associação das duas geometrias. São propostas as equações iniciais de projeto e apresentados os resultados numéricos, obtidos com a simulação com o software Ansys Designer™, sendo esses comparados com resultados experimentais, observando-se uma boa concordância entre os mesmos. Como exemplo de potencial aplicação, uma frequência de ressonância indesejada é deslocada e uma FSS com banda dupla de operação é obtida. Considerando as características observadas, assim como a flexibilidade no ajuste da resposta em frequência, a geometria proposta é, potencialmente, atrativa para aplicações tais como FSS reconfiguráveis e paredes inteligentes.

Palavras-chave: FSS. Anéis trapezoidais. Geometria Estrela de Quatro Braços.
Banda dupla de operação.

ABSTRACT

The main aim of telecommunications is to provide for the human need to communicate from a distance. Lately, due to the intense growth in applications that use telecommunications systems, the demand for the availability of frequency bands in the electromagnetic spectrum has increasingly become greater, creating a need for new technologies to meet these specific requirements both of frequency response and of power levels. In this context, the FSS have been receiving the attention of diverse research groups, since they can play a fundamental role in the optimization of circuits and antennas. In this work, we propose the development of surfaces that are selective in frequency with double band of operation, based on geometry, a star with four arms associated with trapezoidal rings. At first, the characteristics of each geometry are analysed separately. Following that, we discuss the effect of the association of the two geometries. The initial project equations are proposed and the numerical results are presented, obtained with a simulation using ANSYS Designer™ software, with these being compared with experimental results, with a good concordance being observed between the same. As an example of potential application, an unwanted resonance frequency was displaced and a FSS with double band was obtained. Given the characteristics observed, together with the flexibility in the adjustment of the frequency response, the geometry proposed is, potentially, attractive for applications such as reconfigurable FSS and intelligent walls.

Key words: FSS. Trapezoidal rings. Four Arms Star Geometry. Double operation band.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1-1 - Exemplos de comunicação nos tempos atuais [3]. | 16 |
| Figura 1-2 - Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços [8]. | 17 |
| Figura 1-3 - Uso de arquitetura eletromagneticamente inteligente. | 18 |
| Figura 1-4 - Ambiente com WLAN com nível de segurança diferenciado [15]. | 18 |
| Figura 1-5 - Geometria da FSS [8]. | 19 |
| Figura 1-6 - Exemplos de geometrias propostas no GTEMA-IFPB. | 19 |
| Figura 1-7 - Geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais. | 20 |
| Figura 2-1 - Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS [8]. | 21 |
| Figura 2-2 - FSS com elementos do tipo patch condutor [15]. | 22 |
| Figura 2-3 - FSS com elementos do tipo abertura ou slot [15]. | 22 |
| Figura 2-4 - Grupo 1: n-polos conectados pelo centro. | 23 |
| Figura 2-5 - Grupo 2: Espiras. | 23 |
| Figura 2-6 - Grupo 3: Interior sólido. | 24 |
| Figura 2-7 - Grupo 4: Combinações. | 24 |
| Figura 2-8 - Fractais. | 24 |
| Figura 2-9 - FSS em cascata [33]. | 25 |
| Figura 2-10 - FSS passiva e ativa [18]. | 26 |
| Figura 2-11 - FSS utilizada como anteparo na porta do forno de micro-ondas [17]. | 27 |
| Figura 2-12 - Antena refletora do tipo banda dupla (dual band) [15]. | 27 |
| Figura 2-13 - Exemplos de aplicações de FSS em radomes [15]. | 28 |
| Figura 2-14 - Exemplos de aplicações de FSS em radomes [14]. | 29 |
| Figura 2-15 - Ilustração do circuito equivalente a FSS [42]. | 30 |
| Figura 2-16 - Esquema básico utilizado na caracterização experimental da FSS [15]. | 31 |
| Figura 2-17 - Setup para caracterização experimental da FSS usando lentes [50]. | 31 |
| Figura 2-18 - Setup para caracterização experimental da FSS em uma câmara anecrónica [51]. | 32 |
| Figura 3-1 - Geometria estrela de quatro braços [8], [24]. | 33 |
| Figura 3-2 - Etapas da obtenção da geometria estrela de quatro braços. | 34 |
| Figura 3-3 - Fenda para inserção do elemento de comutação. | 34 |
| Figura 3-5 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x frequência (GHz), estrela de quatro braços. | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 3-6 - Geometria da célula unitária, anel trapezoidal..... | 36 |
| Figura 3-7 - Etapas da obtenção da geometria estrela de quatro braços..... | 37 |
| Figura 3-8 - Ângulo θ para determinação dos pontos internos..... | 39 |
| Figura 3-9 - Geometria anéis trapezoidais. | 40 |
| Figura 3-10 - Excitação dos anéis trapezoidais em função da polarização, $h = 1$ mm, $\epsilon_r = 4,4$ | 40 |
| Figura 3-11 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x frequência (GHz), anéis trapezoidais, $h = 1$ mm, $\epsilon_r = 4,4$ | 41 |
| Figura 3-12 - Distribuição da densidade de corrente (J, A/m ²) para diferentes frequências de ressonâncias, polarização E_y | 41 |
| Figura 3-13 - Geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais.. | 42 |
| Figura 3-14 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x frequência (GHz), estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais. | 43 |
| Figura 3-15 - Distribuição da densidade de corrente (J, A/m ²) para diferentes frequências de ressonâncias, polarização E_y | 44 |
| Figura 4-1 - Geometria da célula unitária, anel trapezoidal..... | 45 |
| Figura 4-2 - Geometria da célula unitária das FSS projetadas e fabricadas. | 46 |
| Figura 4-3 - Fotografia da FSS03..... | 46 |
| Figura 4-4 - Configuração dos equipamentos utilizados na medição. | 47 |
| Figura 4-5 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), para FSS01 | 47 |
| Figura 4-6 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), para FSS02. | 48 |
| Figura 4-7 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), para FSS03. | 48 |
| Figura 4-8 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), para FSS04. | 49 |
| Figura 4-9 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), para FSS05. | 49 |
| Figura 4-10 - Distribuição da densidade de corrente (J, A/m ²), $J_{\text{máx.}} = 0,05$ A/m ² , para a FSS04, em 10,33 GHz, polarização E_y | 50 |
| Figura 4-11 - Geometria da célula unitária das FSS projetadas e fabricadas. | 51 |
| Figura 4-12 - Fotografia das FSS projetadas e fabricadas..... | 51 |
| Figura 4-13 - Detalhes da geometria da FSS06..... | 52 |
| Figura 4-14 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), para FSS06, polarização x..... | 53 |
| Figura 4-16 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) x Freq. (GHz), para FSS07, polarização x..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 4-17 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz), para FSS07, polarização y..... | 54 |
| Figura 4-18 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz), para FSS08, polarização x..... | 55 |
| Figura 4-19 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz), para FSS08, polarização y..... | 56 |
| Figura 4-20 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz), para FSS09, polarização x..... | 57 |
| Figura 4-21 - Resposta em frequência, $ S_{21} $ (dB) × Freq. (GHz), para FSS09, polarização y..... | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3-1 - Comparação dos resultados da primeira frequência de ressonância. . | 35 |
| Tabela 4-1 - Dimensões (mm) básicas para as FSS projetadas e fabricadas, $W_x = W_y = 25$ mm, $W = 1$ mm. | 46 |
| Tabela 4-2-Comparação dos resultados obtidos para as frequências de ressonância. | 50 |
| Tabela 4-3 - Dimensões (mm) básicas para as FSS projetadas e | 52 |
| Tabela 4-4 - Frequências de ressonância. | 57 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-----------------|---|
| <i>FSS</i> | <i>Frequency Selective Surface</i> , Superfície seletiva em frequência |
| GTEMA | Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado |
| IFPB | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba |
| <i>FDTD</i> | <i>Finite Difference Time Domain</i> , Diferenças finitas no domínio do tempo |
| <i>FEM</i> | <i>Finite Element Method</i> , Método do elemento finito |
| <i>MoM</i> | <i>Method of Moments</i> , Método dos momentos |
| <i>WCIP</i> | <i>Wave Concept Iterative Procedure</i> , Método iterativo das ondas |
| <i>RFID</i> | <i>Radio Frequency Identification</i> , Identificação por rádio frequência |
| <i>RF</i> | Rádio Frequência |
| RFSS | Superfície seletiva em frequência reconfigurável |
| <i>MEMS</i> | <i>Micro Electro Mechanical Systems</i> |
| <i>WLAN</i> | <i>Wireless Local Area Network</i> |
| <i>RCS</i> | <i>Radar Cross Section</i> |
| <i>GSM</i> | <i>Global System for Mobile Communication</i> , Sistema global para comunicações móveis |
| <i>IEEE</i> | <i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) |
| ϵ_r | Constante dielétrica relativa, permissividade dielétrica relativa |
| FR-4 | Substrato de Fibra de vidro |
| S ₂₁ | Módulo Coeficiente de Transmissão |
| h | Altura do substrato |
| λ_0 | Comprimento de onda |
| <i>WLAN</i> | <i>Wireless Local Area Network</i> - Rede de área local sem-fio |
| W_x | Comprimento da célula em x |
| W_y | Comprimento da célula em y |
| L_x | Comprimento do <i>patch</i> e dos braços da estrela em x |
| L_y | Comprimento do <i>patch</i> e dos braços da estrela em y |
| S_x | Comprimento do ponto de comutação em x |
| S_y | Comprimento do ponto de comutação em y |
| d_{x_1} | Comprimento do corte retangular da extremidade do braço em x |
| d_{y_1} | Comprimento do corte retangular da extremidade do braço em y |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1- INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2-SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA..... | 21 |
| 2-1- Classificações da FSS..... | 21 |
| 2-1-1- Classificação das FSS quanto ao tipo de elemento da célula unitária | 22 |
| 2-1-2- Classificação das FSS quanto à geometria do elemento da célula unitária..... | 22 |
| 2-1-2- Classificação das FSS quanto à espessura..... | 24 |
| 2-1-3- Classificação das FSS quanto à forma de excitação dos arranjos ... | 25 |
| 2-2- Aplicações das FSS..... | 26 |
| 2-2-1- Anteparo da porta de forno de micro-ondas..... | 26 |
| 2-2-2- Antenas banda dupla..... | 27 |
| 2-2-3- Radomes..... | 28 |
| 2-3-Técnicas de análise das FSS..... | 29 |
| 2-4- Caracterização experimental das FSS..... | 30 |
| 3- GEOMETRIAS ESTRELA DE QUATRO BRAÇOS E ANÉIS TRAPEZOIDAIS ... | 33 |
| 3-1- Geometria estrela de quatro braços..... | 33 |
| 3-2- Geometria anéis trapezoidais..... | 36 |
| 4-RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS..... | 45 |
| 4-1- Geometria anéis trapezoidais..... | 45 |
| 4-2- Geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais..... | 50 |
| 5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 58 |
| 5.1- Considerações finais..... | 58 |
| 5.2- Trabalhos futuros..... | 58 |
| REFERÊNCIAS..... | 60 |

1- INTRODUÇÃO

As telecomunicações fazem parte do cotidiano da humanidade desde seu surgimento, oriunda da necessidade do ser humano se comunicar, ou seja, transmitir e receber uma informação. Inicialmente, o meio de comunicação mais natural era a voz humana. Com o passar do tempo, os sistemas de comunicação evoluíram consideravelmente e a partir do final do século XX passamos a viver a era da informação [1], [2]. Mais recentemente, com o avanço das telecomunicações, principalmente os sistemas de comunicação sem fio e os serviços móveis, as comunicações passam por uma rápida expansão tanto no número de usuários, como na diversidade de serviços de telecomunicações, Figura 1-1.

Naturalmente, as demandas de todos esses serviços de telecomunicações, incluindo das unidades móveis às redes de alta capacidade, com seus requisitos de operação (faixa de frequência de operação, níveis de potência, segurança etc.) impõem um desafio tecnológico constante para engenheiros de micro-ondas e antenas, requerendo o desenvolvimento de novas estruturas e configurações de circuitos e antenas.



Figura 1-1 - Exemplos de comunicação nos tempos atuais [3].

Embora esse crescimento seja determinado principalmente por tecnologias desenvolvidas para *tablets* e *smartphones*, o espectro eletromagnético é ainda disputado por diversos serviços, tais como veículos aéreos não tripulados, radar

veicular, sistemas de rádio navegação (GPS, Beidou, GLONASS, Galileo), TV digital, serviços de internet, enlaces terrestres, etc. [4]–[7].

Além da comunicação com o usuário final, é preciso prover enlaces de alta capacidade que possam conectar diferentes pontos das redes de telecomunicações. Ainda que vários desses enlaces sejam ópticos, é indispensável a utilização de enlaces via rádio. Nesse contexto, dadas às limitações da disponibilidade de torres e outros espaços para instalação de antenas, vários sistemas de telecomunicações, com seus próprios requisitos de frequência e potência, compartilham espaços restritos, Figura 1-2.



Figura 1-2 - Torre com antenas destinadas a múltiplos serviços [8].

Dessa forma, a dependência dos sistemas de comunicação sem fio é cada vez maior, levando a uma constante preocupação em permitir que os usuários possam se conectar às redes de comunicação, independentes de onde se encontrem. Neste contexto, no projeto de edificações as condições da propagação eletromagnética passam a chamar cada vez mais a atenção, principalmente em edificações com um grande número de ambientes de uso comum (escritórios, consultórios médicos, lojas, etc.), por apresentarem uma elevada densidade de usuários, propagação em ambiente indoor e alta taxa de reuso de frequências, Figura 1-3; ou em ambientes

que requerem um nível de segurança diferenciado (presídios, embaixadas, etc.),
Figura 1-4, [9]–[14].

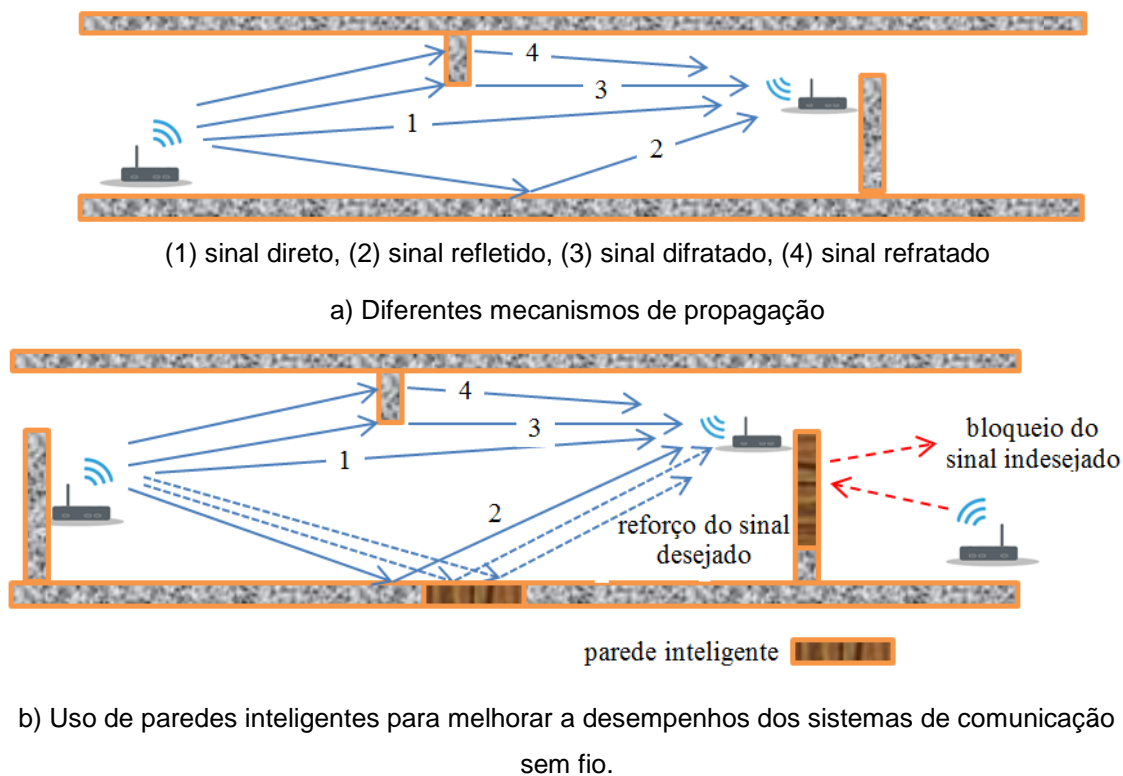


Figura 1-3 - Uso de arquitetura eletromagneticamente inteligente.

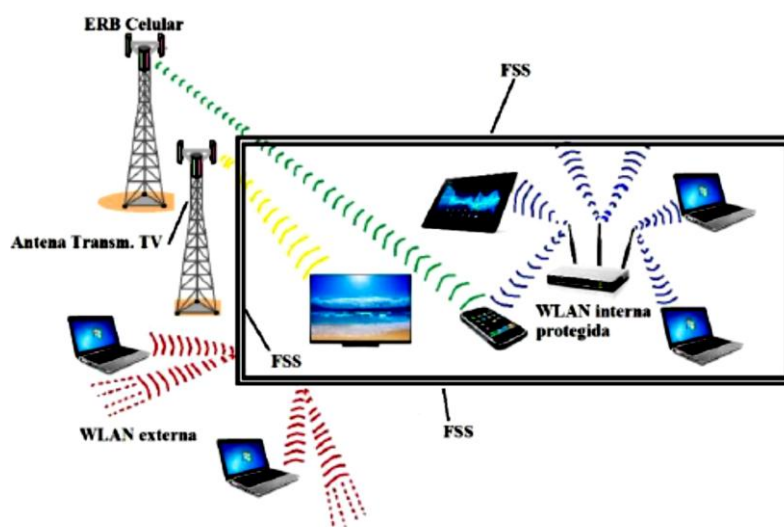


Figura 1-4 - Ambiente com WLAN com nível de segurança diferenciado [15].

Neste contexto, as superfícies seletivas em frequência, *frequency selective*

surfaces, FSS, têm encontrado diversas aplicações. FSS são estruturas formadas por arranjos geométricos periódicos, geralmente planares, dispostos sobre uma superfície dielétrica, Figura 1-5. Essas estruturas, detalhadas no Capítulo 2, encontram diversas aplicações, tanto na área civil, como militar, desde a faixa de frequência de micro-ondas até terahertz.

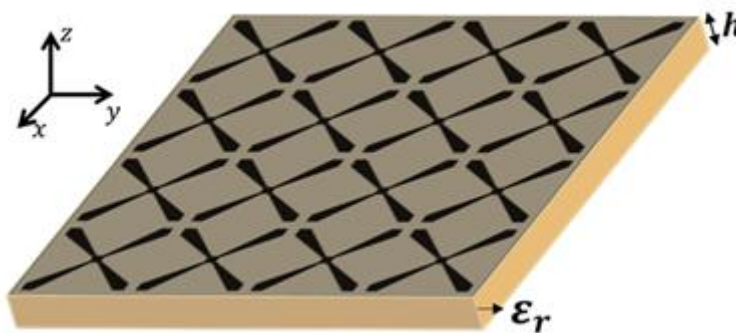
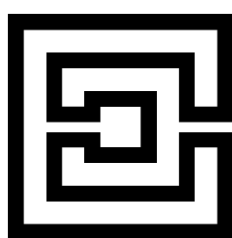
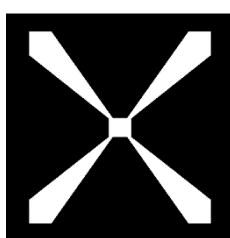


Figura 1-5 - Geometria da FSS [8].

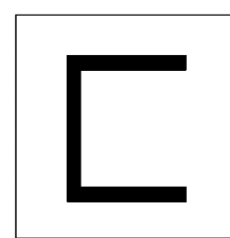
Um dos parâmetros de maior flexibilidade no projeto de uma FSS é a geometria da célula unitária [17]–[20]. A partir de estudos realizados no GTEMA-IFPB, foram propostas novas geometrias para o elemento básico da FSS, tais como: Matrioska, Figura 1-6 (a) [15],[21],[22], estrela de quatro braços, Figura 1-6 (b) [16], [23]–[25], geometria em forma de U, Figura 8 (c) [26], [27].



a) Matrioska



b) Estrela de quatro braços



c) Em forma de U

Figura 1-6 - Exemplos de geometrias propostas no GTEMA-IFPB.

Quando se deseja obter uma FSS com mais de uma banda de operação, ou ajustar a largura de banda de operação, uma opção é associar diferentes geometrias, sendo importante que essas geometrias, dentro do possível, apresentem respostas em frequência em que os campos não estejam fortemente acoplados. Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de FSS com banda dupla de operação,

baseadas na geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais, Figura 1-7.

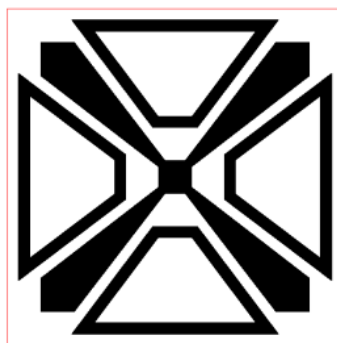


Figura 1-7 - Geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais.

A resposta em frequência de cada geometria é analisada separadamente, enfatizando a geometria anéis trapezoidais, e após é analisada a resposta em frequência da estrutura combinada, onde a estrela de quatro braços é associada aos anéis trapezoidais. Este trabalho está dividido da seguinte forma:

No capítulo dois são apresentados um breve histórico conceitual e os tipos de superfícies seletivas em frequência, bem como suas classificações quanto à geometria, preenchimento da célula unitária e espessura da camada de metalização e, algumas aplicações em sistemas de telecomunicações.

No capítulo três são descritas as geometrias estrela de quatro braços e anéis trapezoidais, apresentando as maneiras como são obtidas e suas características, bem como, uma análise comportamental da frequência de ressonância em função do consórcio, estrela de quatro braços e os anéis trapezoidais.

No capítulo quatro são apresentados os resultados numéricos e experimentais para FSS baseadas em anéis trapezoidais, comparando os resultados obtidos através dos ensaios de simulação obtidos com a utilização do *software Ansys DesignTM* e os resultados obtidos na fase experimental via medições realizadas no Laboratório de Micro-ondas.

No capítulo cinco são feitos comentários sobre os resultados obtidos, as considerações finais sobre todo o trabalho desenvolvido e também sugestões de trabalhos futuros para a continuidade desta pesquisa.

2- SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA

Historicamente, o estudo das superfícies seletivas em frequência, FSS, inicia-se quando o físico David Rittenhouse descobriu no século XVIII que algumas cores do espectro de luz eram suprimidas quando essa era observada através de um lenço de seda. Posteriormente ele viria a avançar na investigação de grades de difração em óptica, cujo fenômeno era usado para decompor um feixe de luz não monocromática em suas ordens espectrais, como documentado em uma correspondência de relatos científicos [18], [20].

Fundamentalmente, as FSS apresentam uma resposta em frequência dependente da geometria do elemento básico do arranjo, do tipo de elemento (abertura ou camada de metalização), das características do dielétrico (altura, constante dielétrica, tangente de perdas, etc.), da periodicidade do arranjo e da polarização da onda incidente, Figura 2-1 [17]–[20].

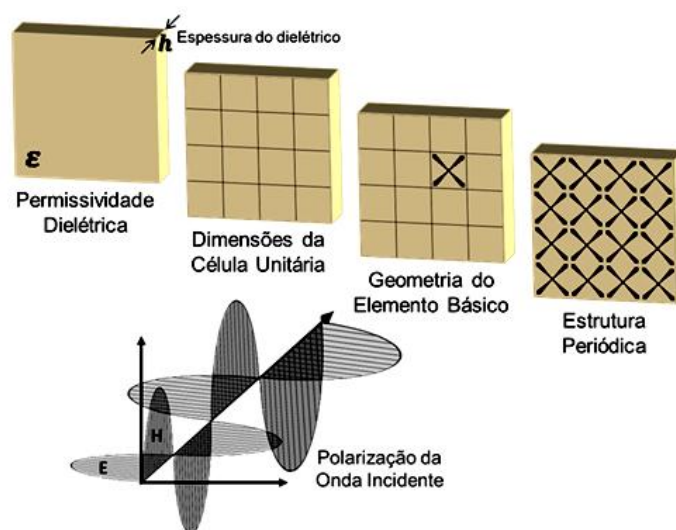


Figura 2-1- Parâmetros que afetam a resposta em frequência da FSS [8].

2-1-Classificações da FSS

As FSS podem ser classificadas de diferentes formas. Neste Capítulo são apresentadas algumas de suas classificações.

2-1-1-Classificação das FSS quanto ao tipo de elemento da célula unitária

As superfícies seletivas em frequência são estruturas geralmente compostas por arranjos periódicos de elementos impressos sobre um substrato, que se comportam como um filtro espacial, com uma resposta em frequência que tanto pode ser do tipo rejeita faixa, para as geometrias tipo *patch* condutor, Figura 2-2, como passa faixa, para as geometrias tipo fenda, ou *slot*, Figura 2-3. Vale destacar que essa classificação serve apenas como base e não abrangem todas as geometrias.

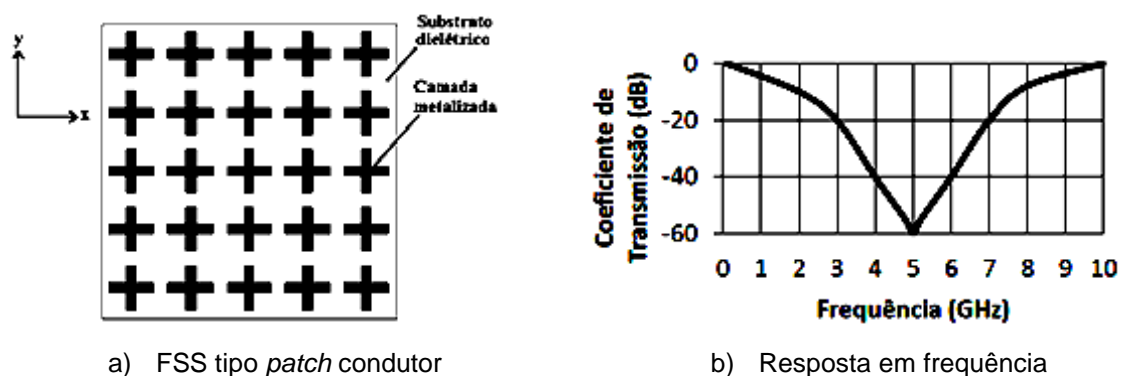


Figura 2-2 - FSS com elementos do tipo patch condutor [15].

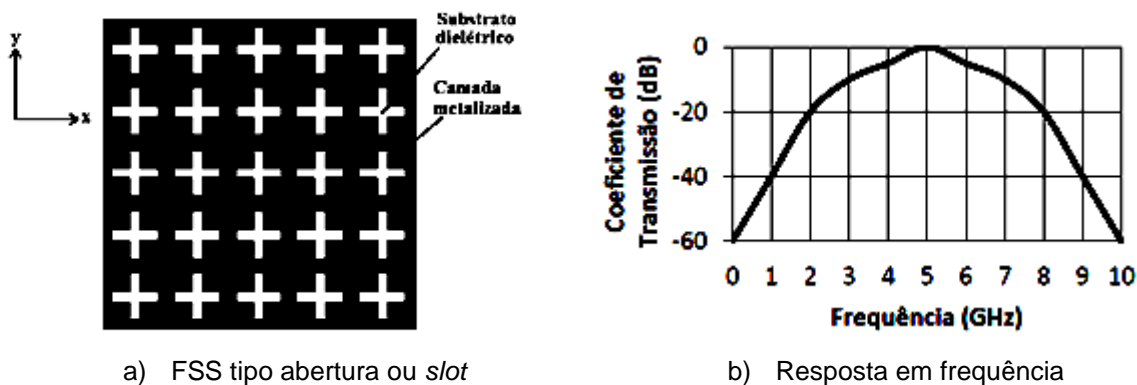


Figura 2-3 - FSS com elementos do tipo abertura ou slot [15].

2-1-2-Classificação das FSS quanto à geometria do elemento da célula unitária

A geometria é um dos elementos de maior versatilidade para obtenção de uma determinada resposta em frequência de uma FSS. Na literatura existe uma grande variedade de pesquisas sobre FSS que utilizam as mais diversas geometrias como elemento básico da célula unitária. A princípio, pode-se afirmar que a ressonância de geometrias abertas (dipolos, arcos, etc.) ocorre quando sua dimensão efetiva é da

ordem de meio comprimento de onda ou seus múltiplos. Já para as geometrias fechadas (espiras quadradas, espiras circulares, etc.) essa ressonância ocorre quando sua dimensão efetiva é da ordem de um comprimento de onda ou seus múltiplos. Destaque-se aqui que o conceito de comprimento efetivo depende, entre outros fatores, da geometria e da polarização.

Para Munk, os elementos geométricos estão divididos em quatro grupos [18]:

- **Grupo 1:** Corresponde aos n-polos conectados pelo centro. As formas mais conhecidas são o dipolo fino, o dipolo cruzado, a cruz de Jerusalém e o tripolo. Na Figura 2-4 são apresentados exemplos de elementos pertencentes ao Grupo 1.

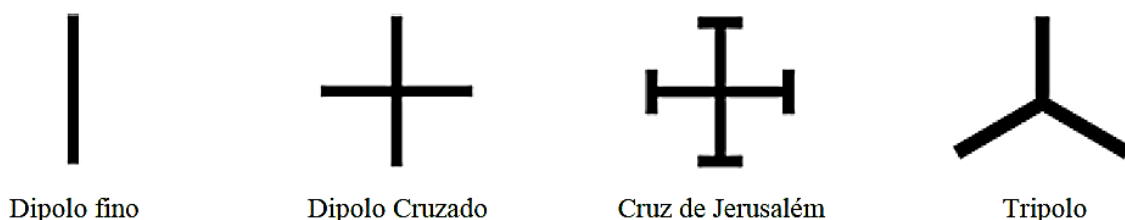


Figura 2-4 - Grupo 1: n-polos conectados pelo centro.

- **Grupo 2:** Reúne os elementos do tipo espira, onde os mais conhecidos são as espiras quadradas, quadradas duplas, quadradas com grade e os anéis circulares concêntricos. Na Figura 2-5 são mostrados exemplos de elementos pertencentes ao Grupo 2.

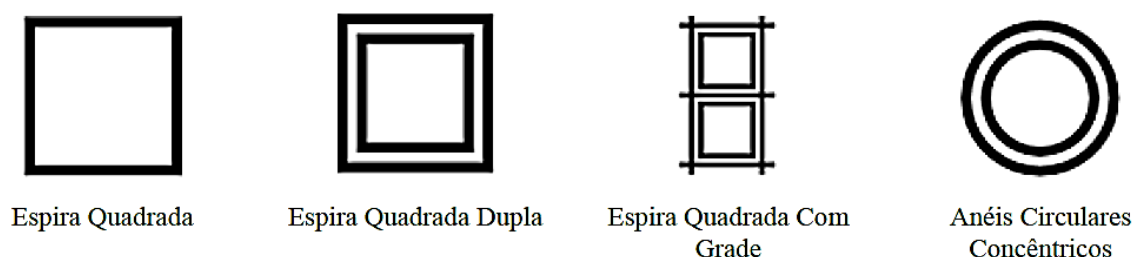


Figura 2-5 - Grupo 2: Espiras.

- **Grupo 3:** Formado pelos elementos de interior sólido, sendo os tipos mais comuns os *patches* quadrados, retangulares, hexagonais e circulares. Esses elementos são exemplificados na Figura 2-6.

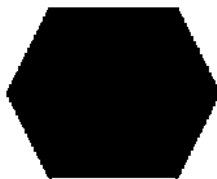
*Patch Retangular**Patch Hexagonal**Patch Circular*

Figura 2-6 - Grupo 3: Interior sólido.

- **Grupo 4:** Composto por elementos formados a partir da modificação e combinação de elementos típicos. Há uma variedade infinita de tipos de elementos que compõem esse grupo. Na Figura 2-7 algumas formas desse grupo são ilustradas.

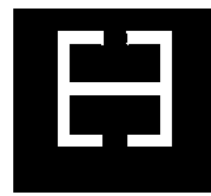
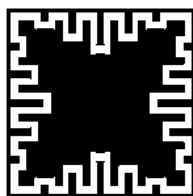
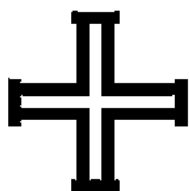
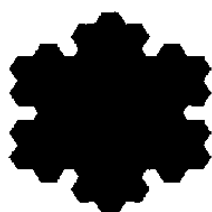


Figura 2-7 - Grupo 4: Combinações.

Além das formas citadas anteriormente, podemos também destacar o uso de elementos fractais em FSS, Figura 2-8. Com característica interessante de auto-similaridade, o uso de fractais apresenta redução da dimensão dos elementos e operação em múltiplas faixas de frequência [28]–[30].



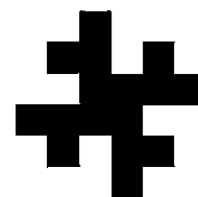
Fractal de Gosper



Fractal de Sierpinski



Fractal de Koch



Fractal de Minkowski

Figura 2-8 - Fractais.

2-1-2-Classificação das FSS quanto à espessura

As FSS podem ainda ser classificadas em função da espessura. As FSS de anteparo fino são aquelas que possuem uma espessura da camada de metalização menor que $0,001 \lambda_0$, em que o λ_0 é o comprimento de onda para a frequência de ressonância da FSS. Em geral, possuem pequeno volume e baixo custo, podendo ser empregada na sua produção a tecnologia convencional de circuito impresso [18], [20]. Já as FSS de anteparo espesso, ou em cascata, Figura 2-9, apresentam um maior volume e peso, requerendo na sua fabricação uma maior precisão. 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 [31]–[33].

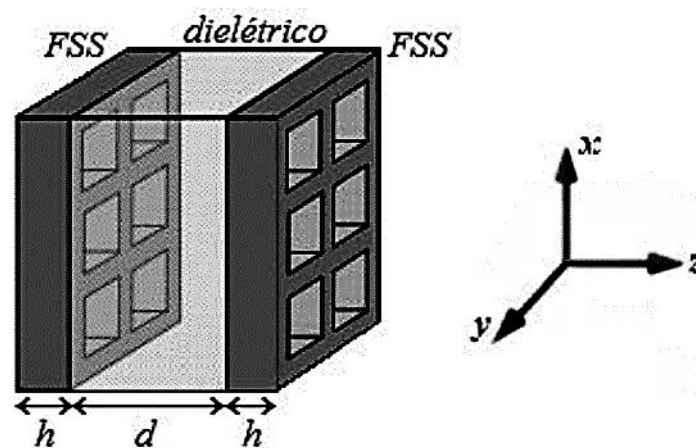


Figura 2-9 - FSS em cascata [33].

2-1-3-Classificação das FSS quanto à forma de excitação dos arranjos

As FSS podem ser excitadas por uma onda eletromagnética incidente, como também pode ser excitada por geradores individuais conectados aos elementos básicos. No primeiro caso a FSS é denominada passiva, enquanto que no caso dos geradores conectados aos elementos a FSS passa a ser ativa.

As FSS passivas possuem como vantagem a menor complexidade no seu projeto e menor custo de produção. Entretanto, as FSS passivas só podem ser reconfiguradas a partir da inserção de elementos adicionais (diodos, PIN, varactores, chaves MEMS, etc.) [34]–[36]. No segundo caso, FSS ativas, são utilizados geradores acoplados aos elementos da FSS, sendo que as amplitudes e fases ao longo do arranjo obedecem a uma regra para obtenção da resposta em frequência desejada. Uma das vantagens das FSS ativas é a possibilidade de sua reconfiguração a partir

da modificação das amplitudes e fases associadas a cada elemento, porém apresentam uma maior complexidade de projeto e um custo mais elevado [18]. Na Figura 2-10 são ilustrados os dois casos.

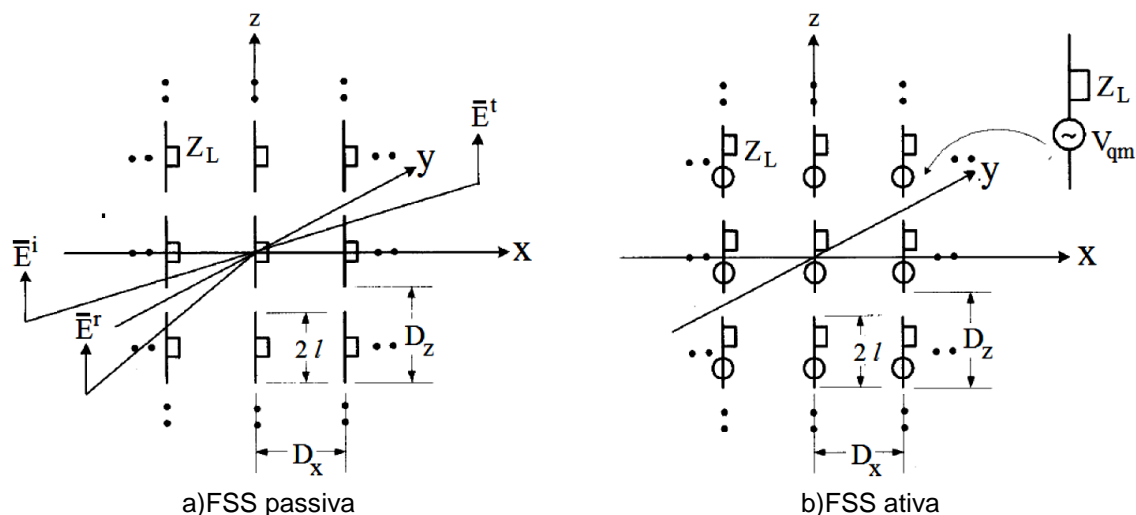


Figura 2-10 - FSS passiva e ativa [18].

2-2-Aplicações das FSS

As aplicações das FSS podem ser encontradas nas mais diversas faixas do espectro eletromagnético, incluindo micro-ondas, ondas milimétricas e terahertz [17]–[20], [37]. A seguir são apresentados alguns exemplos de aplicações das FSS.

2-2-1-Anteparo da porta de forno de micro-ondas

A propriedade reflexiva da FSS é utilizada em fornos de micro-ondas doméstico Figura 2-11. A FSS atua como um bloqueador na porta do forno de micro-ondas e possui características de um filtro passa-altas, deixando passar frequências na faixa de luz visíveis e rejeitando as faixas de micro-ondas em torno de 2,45 GHz.



Figura 2-11 - FSS utilizada como anteparo na porta do forno de micro-ondas [26].

2-2-2- Antenas banda dupla

As FSS podem ser utilizadas para obter maior eficiência de antenas refletoras, como por exemplo, as antenas do tipo banda dupla (*dual band*), Figura 2-12, onde é ilustrado um sistema de antena do tipo banda dupla, apresentando o alimentador 2 colocado no ponto focal do refletor principal, enquanto que o alimentador 1 é colocado no ponto focal do sub-refletor, que é formado por uma FSS. Esse anteparo é projetado para refletir a faixa de frequência oriunda do alimentador 1, mas é totalmente transparente para a faixa de frequência do alimentador 2 [38], [39].

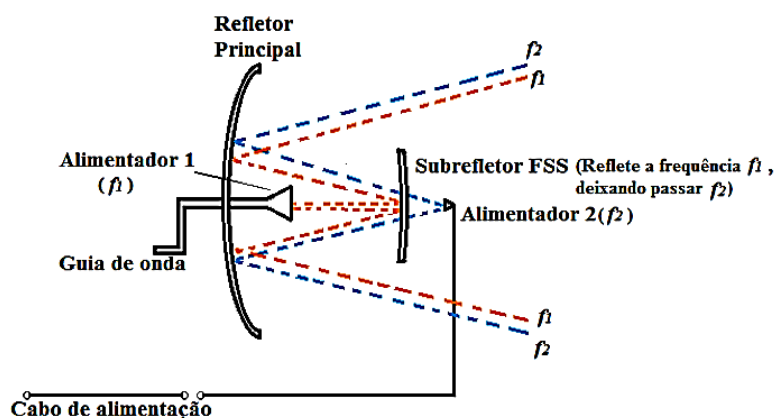


Figura 2-12 - Antena refletora do tipo banda dupla (dual band) [15].

2-2-3- Radomes

As FSS também são bastante utilizadas nos radomes, fornecendo 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 da banda o sinal é refletido, evitando-se interferências indesejadas [15], [19]. Na Figura 2-13, são mostrados exemplos de FSS utilizadas como radome.

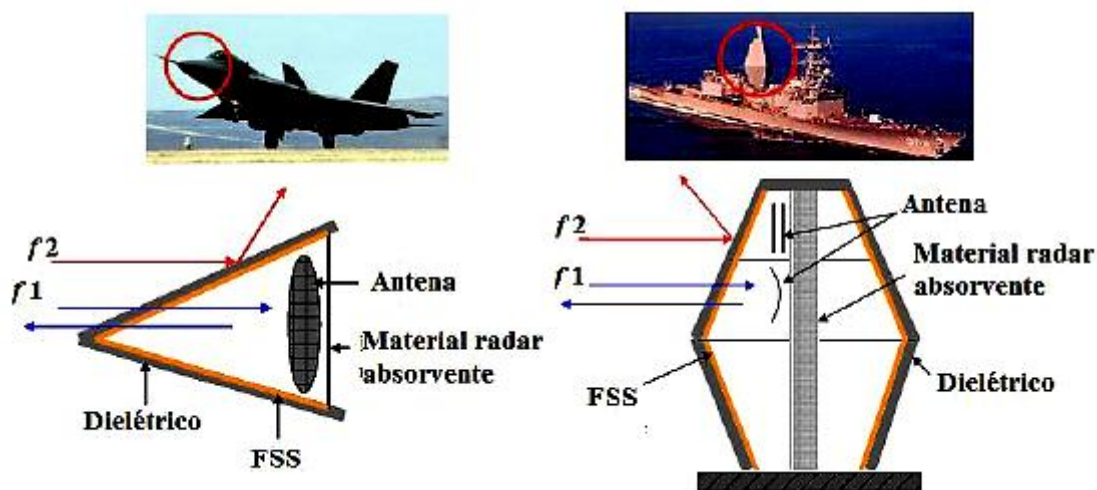


Figura 2-13 - Exemplos de aplicações de FSS em radomes [15].

2-2-4- Arquiteturas eletromagneticamente inteligentes

Mais recente, as FSS têm sido utilizadas na otimização da propagação em ambientes internos e no aumento da eficiência energética de construções, por meio da introdução de paredes e janelas inteligentes, como exemplificado na Figura 2-14 [9]–[14]. Esta é uma nova área, que vem sendo denominada arquitetura eletromagneticamente inteligente.

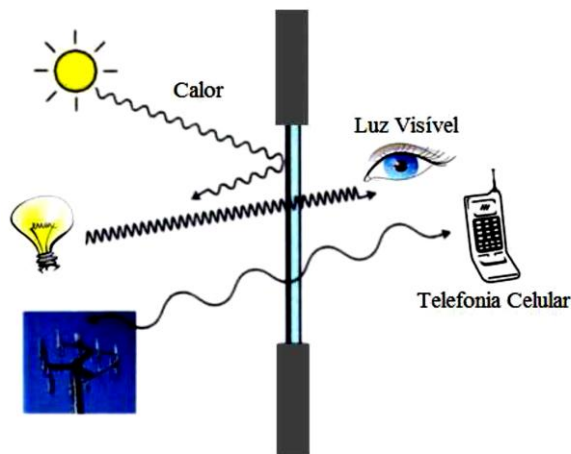


Figura 2-14 - Exemplos de aplicações de FSS em radomes [14].

As aplicações aqui citadas são apenas alguns exemplos, naturalmente não incluindo a diversas aplicações.

2-3-Técnicas de análise das FSS

Existem diversas técnicas utilizadas para analisar as FSS. Inicialmente, alguns autores desenvolveram fórmulas simples e aproximadas que determinam as características de transmissão e de reflexão para as FSS tipo *patches* condutores ou aberturas retangulares. Sendo que essas fórmulas possuem limitações para algumas geometrias específicas, podendo apresentar resultados imprecisos, principalmente para frequências mais elevadas e ressonâncias de ordem superior [19], [20], [40], [41]. A técnica de modelagem do circuito equivalente para FSS, Figura 2-15, requer recursos computacionais reduzidos, quando comparados aos métodos de análise de onda completa e, portanto, é útil para prever com rapidez o desempenho das FSS.

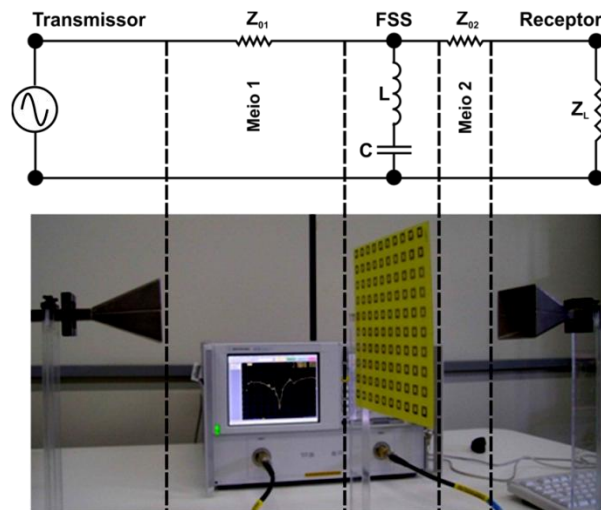


Figura 2-15 - Ilustração do circuito equivalente a FSS [42].

Com o avanço da disponibilidade dos recursos computacionais, vários métodos numéricos passaram a ser utilizados, com soluções mais precisas, principalmente em frequências mais elevadas, incluindo frequências de ressonâncias de ordem superior, assim como para uma maior diversidade de geometrias. Pode-se citar como exemplos de métodos numéricos empregados na análise de FSS:

- Método dos Momentos (MoM – *Method of Moments*) [43], [44];
- Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite-Element Method*) [45], [46];
- Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD – *Finite Difference Time Domain*) [47];
- Método Iterativo das Ondas (WCIP – *Wave Concept Iterative Procedure*) [48], [49].

2-4- Caracterização experimental das FSS

Basicamente, a técnica utilizada para caracterizar experimentalmente as propriedades de reflexão e transmissão das FSS consiste em utilizar duas antenas diretivas, geralmente cornetas, ligadas a um analisador de redes, sendo entre essas antenas, posicionada a FSS, Figura 2-16. A onda eletromagnética emitida incide sobre a FSS, que reflete ou deixa passar parte da potência, de acordo com as suas características. A potência que atravessa a FSS, potência transmitida é captada pela antena receptora e assim é possível caracterizar a resposta em frequência da FSS.

A medição na polarização invertida é obtida rotacionando a FSS em 90° [15], [17], [19], [26].

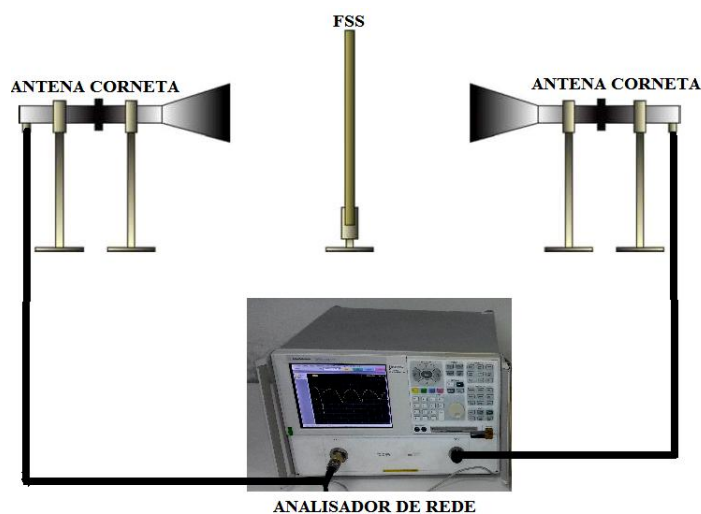


Figura 2-16 - Esquema básico utilizado na caracterização experimental da FSS [15].

Dados imprecisos podem ser obtidos devido às difrações ocasionadas pelas bordas da FSS, originadas devido à largura de feixe das antenas cornetas e ao tamanho relativamente pequeno da FSS. Outra fonte de erros nesta técnica de medição é a presença de sinais refletidos no próprio ambiente de medição, sendo esses mais críticos quando se deseja caracterizar FSS passa-faixa. Para minimizar essas limitações podem ser empregadas lentes entre as antenas e as FSS, Figura 2-17, ou a realização de medições em uma câmara anecóica, Figura 2-18, o que nem sempre está disponível.

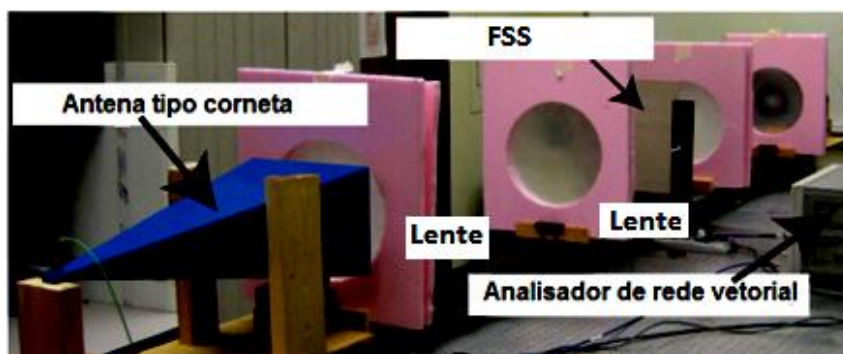


Figura 2-17 - Setup para caracterização experimental da FSS usando lentes [50].

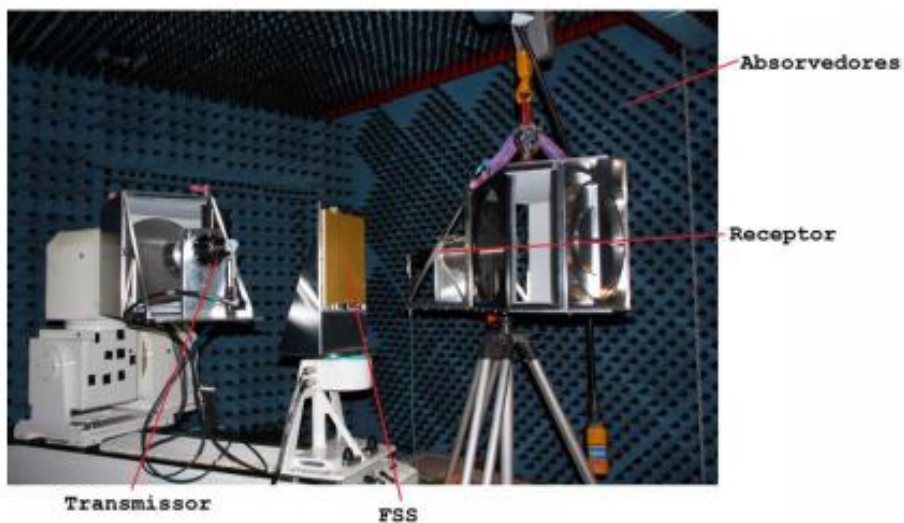


Figura 2-18 - Setup para caracterização experimental da FSS em uma câmara anecóica [51].

Nesta Dissertação são consideradas FSS passivas e não reconfiguráveis, do tipo anteparo fino, sendo usado na caracterização numérica o software comercial *ANSYS Designer*, baseado no Método dos Momentos. Na caracterização experimental das FSS foi utilizado o setup ilustrado na Figura 2-16.

3-GEOMETRIAS ESTRELA DE QUATRO BRAÇOS E ANÉIS TRAPEZOIDAIS

Neste Capítulo são descritas as geometrias estrela de quatro braços e anéis trapezoidais, apresentando a maneira como são obtidas e suas características.

3-1-Geometria estrela de quatro braços

A partir de projetos de iniciação científica desenvolvidos no IFPB nos anos de 2011 e 2012, [52], [53], que investigou os efeitos de cortes triangulares em FSS com geometria em forma de *patches* retangulares, foi identificada uma geometria com características bastante atrativas em relação às propriedades de miniaturização e comutação, sendo essa geometria denominada estrela de quatro braços, Figura 3-1. Com a continuidade das pesquisas sobre essa geometria, foram consideradas assimetrias e incluído o ponto de comutação [16], [24], [54].

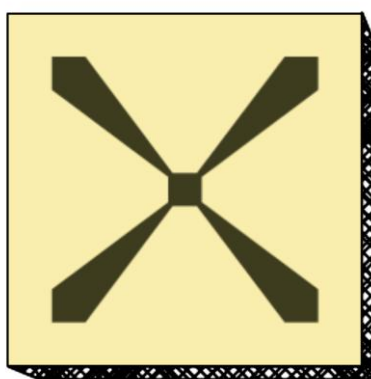


Figura 3-1 - Geometria estrela de quatro braços [16], [24].

Para obter-se a geometria estrela de quatro braços inicialmente é definida a célula unitária com dimensões W_x e W_y , Figura 3-2-(a). Em seguida, é inserido um *patch* retangular de dimensões L_x e L_y , centralizado na célula unitária. O ponto de comutação é delimitado no centro do *patch* com dimensões S_x e S_y . Considerando a geometria simétrica em relação aos eixos (horizontal e vertical), as dimensões dos braços da estrela são definidas por L_x , L_y (mesmas dimensões do *patch*), dx_1 , dy_1 (espaçamento da fenda triangular ao vértice do *patch* retangular) e posteriormente, são traçadas diagonais das extremidades dos braços da estrela até o canto oposto

do ponto de comutação, Figura 3-2-(b). Na sequência, a camada metálica que não constitui a estrela de quatro braços é retirada, dando forma à geometria estrela de quatro braços, Figura 3-2-(c) [8],[23]–[25], [16]. Caso seja necessário inserir um elemento de comutação, um diodo PIN, por exemplo, é inserida uma fenda no ponto de comutação, separando os braços inferior e superior, Figura 3-3.

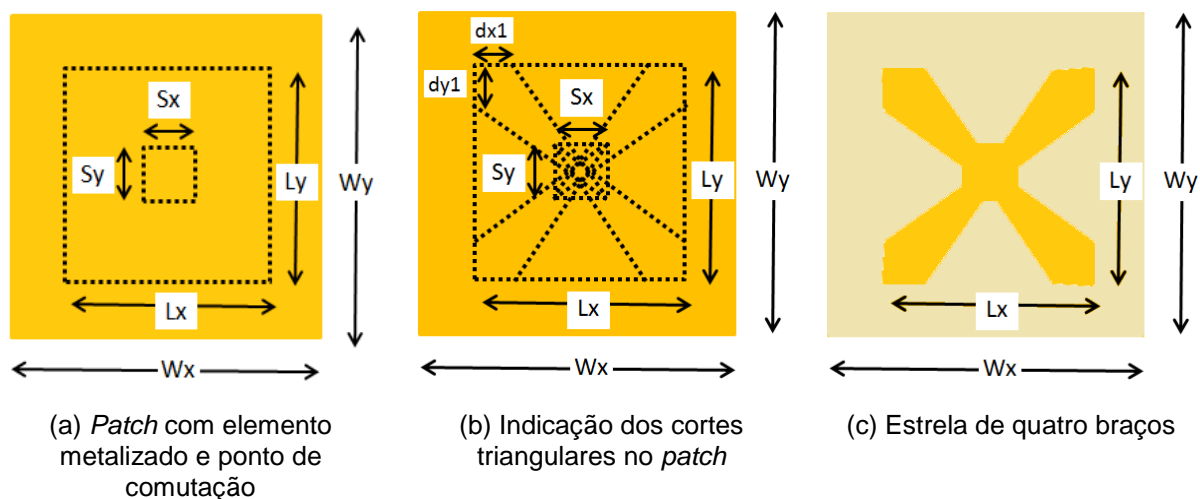


Figura 3-2 - Etapas da obtenção da geometria estrela de quatro braços.

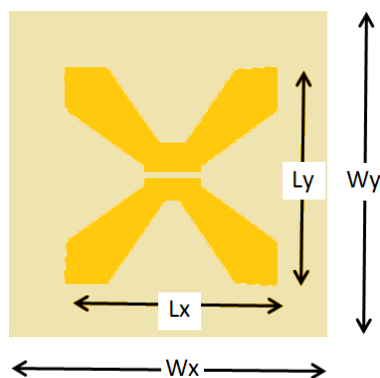


Figura 3-3 - Fenda para inserção do elemento de comutação.

Uma aproximação para o cálculo da primeira frequência de ressonância da geometria estrela de quatro braços simétrica, desconsiderando o efeito da fenda, para um substrato de espessura $h \ll \lambda_0$, é dada por:

$$f_{res}(GHz) = \frac{0,3}{2L_{efe}} \quad (1)$$

Sendo,

$$L_{efe} = Lx + Ly \quad (2)$$

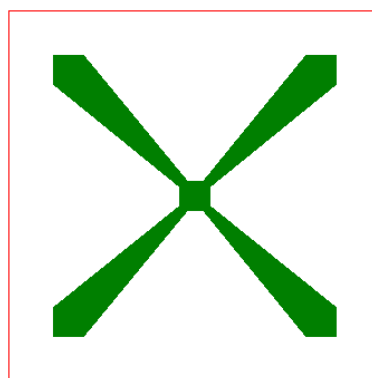
Para exemplificar a aplicação de (1), sejam observados os resultados apresentados em [16] e [24], Tabela 3-1. Note que (1) fornece valores aproximados, servindo como uma etapa inicial para uma otimização numérica.

Tabela 3-1 - Comparação dos resultados da primeira frequência de ressonância.

| | WCIP | MoM | Experimental | Eq. (1) |
|----------|-------------|------------|---------------------|----------------|
| L= 12 mm | 6,10 GHz | 6,30 GHz | 6,32 GHz | 6,25 GHz |
| L= 14 mm | 5,78 GHz | 5,60 GHz | 5,60 GHz | 5,36 GHz |

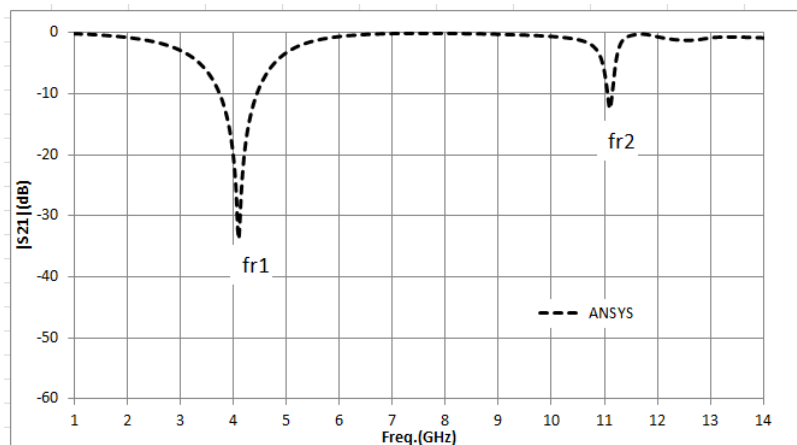
$Wx = Wy = 20 \text{ mm}$, $Lx = Ly = L$, $h = 0,8 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 4,4$ (FR-4), $Sx = Sy = dx = dy = 2,0 \text{ mm}$

Como um exemplo de resposta em frequência, seja considerada a geometria estrela de quatro braços apresentada na Figura 3-4. Para essa estrutura, a resposta em frequência é apresentada na Figura 3-5, sendo as frequências de ressonância, 4,10 GHz e 11,10 GHz. Utilizando a equação (1), o valor calculado para a primeira frequência de ressonância é 3,95 GHz, uma diferença menor que 4%, quando comparada ao valor da frequência de ressonância obtida utilizando o programa ANSYS-Designer.



$Wx = Wy = 25 \text{ mm}$, $Lx = Ly = 19 \text{ mm}$, $h = 1,0 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 4,4$ (FR-4), $Sx = Sy = dx = dy = 2,0 \text{ mm}$

Figura 3-4-Geometria da célula unitária, estrela de quatro braços.



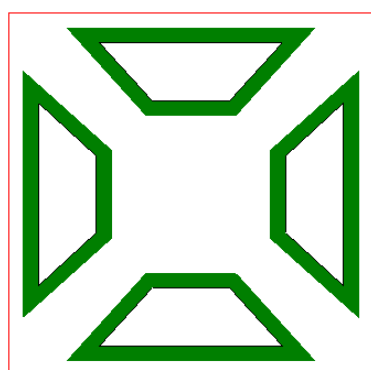
$W_x = W_y = 25 \text{ mm}$, $L_x = L_y = 19 \text{ mm}$, $h = 1,0 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 4,4$ (FR-4), $S_x = S_y = dx = dy = 2,0 \text{ mm}$

Figura 3-5 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) x frequência (GHz), estrela de quatro braços.

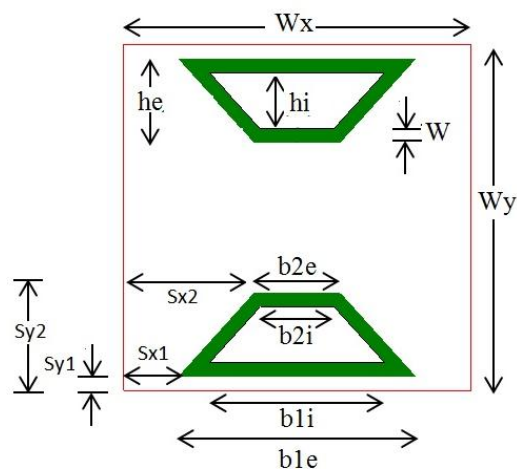
Na continuidade das pesquisas sobre a geometria estrela de quatro braços, foram apresentadas variações, destacando-se a estrela de quatro braços tipo fenda [23], [25], [55] e tipo fendas com bordas [56], [57], que não serão nesta dissertação estudadas.

3-2-Geometria anéis trapezoidais

Procurando investigar outras geometrias, que permitam ajuste na resposta em frequência, foi proposta nesta dissertação a geometria anéis trapezoidais, Figura 3-6. Trata-se de um arranjo de quatro anéis trapezoidais, onde cada anel pode ser dimensionado separadamente. Embora exista essa flexibilidade, seja considerado inicialmente que os quatro anéis são idênticos.



a) Geometria da célula unitária



b) Especificações das dimensões da célula unitária

Figura 3-6 - Geometria da célula unitária, anel trapezoidal.

Sendo:

- 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;
- S_{x2} : localização inicial da base menor do trapézio ao longo do eixo x;
- S_{y2} : localização inicial da base menor 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.

A obtenção da geometria anéis trapezoidais inicia-se com a determinação das dimensões da célula unitária, W_x e W_y . Tendo em vista que a geometria final é composta por quatro anéis simétricos, são determinados os quatro vértice do trapézio externo, $p_{1e}(x_{1e},y_{1e})$, $p_{2e}(x_{2e},y_{2e})$, $p_{3e}(x_{3e},y_{3e})$ e $p_{4e}(x_{4e},y_{4e})$, Figura 3-7. Sabendo-se a largura da fita que compõe o anel, W , são determinados os quatro pontos do trapézio interno, $p_{1i}(x_{1i},y_{1i})$, $p_{2i}(x_{2i},y_{2i})$, $p_{3i}(x_{3i},y_{3i})$ e $p_{4i}(x_{4i},y_{4i})$. Subtrai-se o trapézio interno do trapézio externo e obtém o anel trapezoidal. Finalmente, o anel é espelhado horizontalmente, obtendo-se a geometria final.

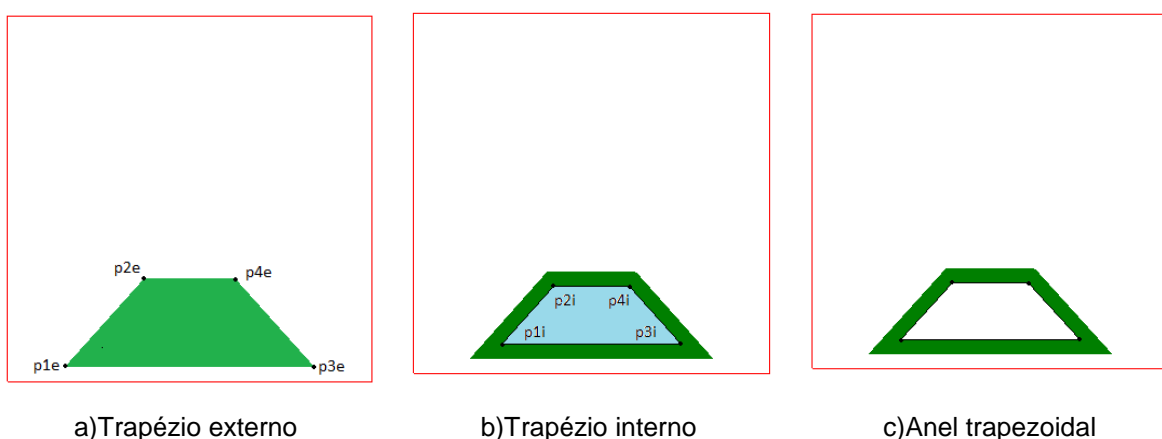


Figura 3-7 - Etapas da obtenção da geometria estrela de quatro braços.

Para ilustrar o procedimento, considere-se o seguinte exemplo:

-Dimensões da célula unitária: $W_x = W_y = 25,0 \text{ mm}$.

-Largura da fita, $W = 1,0 \text{ mm}$.

-O anel trapezoidal está localizado a 1 mm da borda de célula, $S_y = 1,0 \text{ mm}$.

-A base maior do anel têm $17,0 \text{ mm}$, $b_{1e} = 17,0 \text{ mm}$.

-A base menor do anel têm $6,2 \text{ mm}$, $b_{2e} = 6,2 \text{ mm}$.

-A altura externa do anel têm $6,0 \text{ mm}$, $h_e = 6,0 \text{ mm}$.

A partir dos dados acima, determina-se:

$$S_{x1} = \left(\frac{W_x - b_{1e}}{2} \right) = 4,0 \quad (3)$$

$$S_{x2} = \left(\frac{W_x - b_{2e}}{2} \right) = 9,4 \quad (4)$$

$$S_{y2} = S_{y1} + h_e = 7,0 \quad (5)$$

$$x_{1e} = S_{x1} = 4,0 \quad (6)$$

$$y_{1e} = S_{y1} = 1,0 \quad (7)$$

$$x_{2e} = S_{x2} = 9,4 \quad (8)$$

$$y_{2e} = S_{y2} = 7,0 \quad (9)$$

$$x_{3e} = x_{1e} + b_{1e} = 21,0 \quad (10)$$

$$y_{3e} = S_{y1} = 1,0 \quad (11)$$

$$x_{4e} = x_{2e} + b_{2e} = 15,6 \quad (12)$$

$$y_{4e} = S_{y2} = 7,0 \quad (13)$$

Para a determinação dos pontos internos, seja considerado o ângulo θ na Figura 3-8.

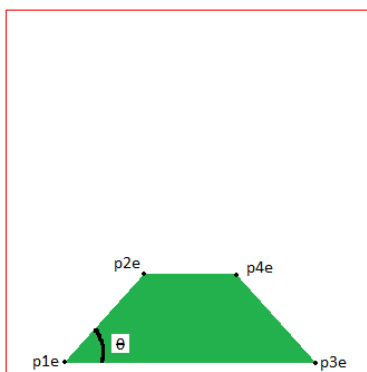


Figura 3-8 - Ângulo θ para determinação dos pontos internos.

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{y_{2e} - y_{1e}}{x_{2e} - x_{1e}} \right) = 0,84 \text{ rad} = 48,1^\circ \quad (14)$$

$$x_{1i} = x_{1e} + \frac{W}{\text{tg}(\theta)} + \frac{W}{\text{sen}(\theta)} = 6,25 \quad (15)$$

$$y_{1i} = y_{1e} + W = 2,0 \quad (16)$$

$$x_{2i} = x_{1i} + \frac{h_e - 2W}{\text{tg}(\theta)} = 9,85 \quad (17)$$

$$y_{2i} = y_{1i} + h_e - 2W = 6,0 \quad (18)$$

$$x_{3i} = Wx - x_{1i} = 18,75 \quad (19)$$

$$y_{3i} = y_{1i} = 2,0 \quad (20)$$

$$x_{4i} = Wx - x_{2i} = 15,15 \quad (21)$$

$$y_{4i} = y_{2i} = 6,0 \quad (22)$$

Na Figura 3-9 é apresentado o anel correspondente ao exemplo, assim como a geometria anéis trapezoidais.

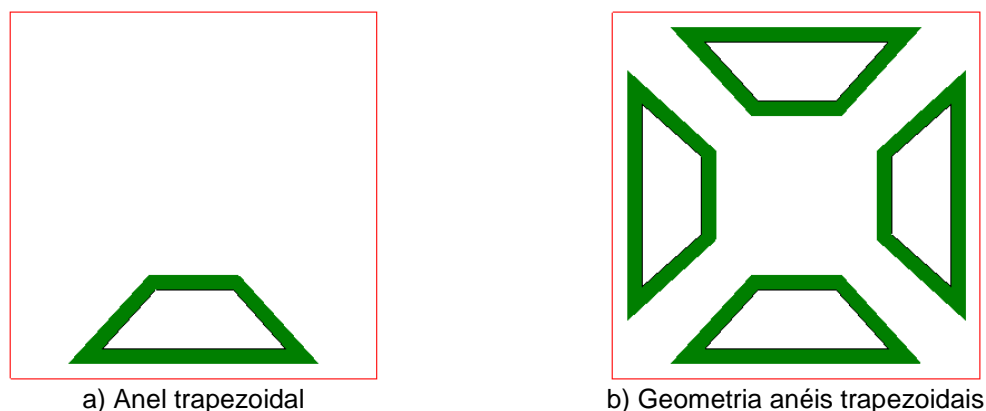


Figura 3-9 - Geometria anéis trapezoidais.

Uma das características da geometria anéis trapezoidais é a excitação por pares dos anéis, em função da direção do campo elétrico, como ilustrado na Figura 3-10. Dessa forma, as frequências de ressonância podem ser ajustadas separadamente.

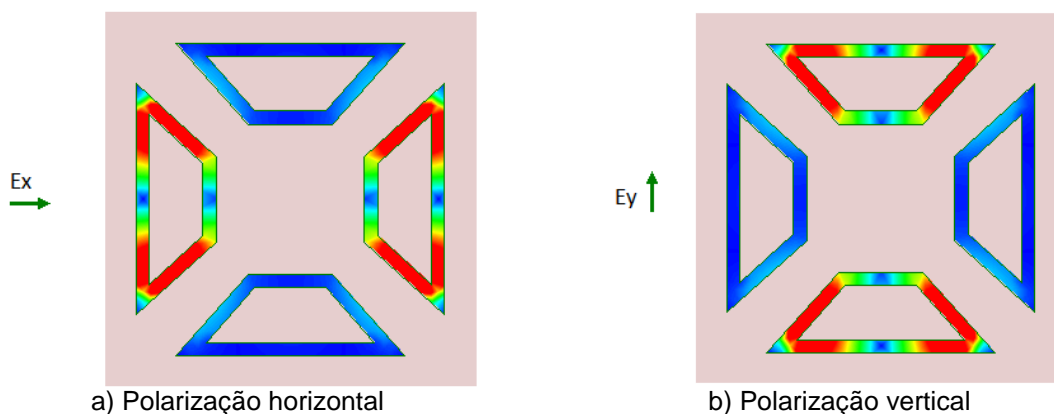


Figura 3-10- Excitação dos anéis trapezoidais em função da polarização, $h = 1 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 4,4$.

Ainda para a geometria da Figura 3-9, seja considerada a sua resposta em frequência, apresentada na Figura 3-11. As frequências de ressonância são 7,25 GHz, 8,15 GHz e 12,00 GHz. Para facilitar a análise dessas ressonâncias, será considerada apenas a polarização y . Na Figura 3-12 são apresentadas as respectivas distribuições das densidades de corrente. Não é evidente a obtenção de equações para essas frequências de ressonância. Portanto, propõe-se neste trabalho duas equações aproximadas, que estabelecem uma faixa inicial de frequência onde podem

estar contidas as duas primeiras ressonâncias. Destaque-se que essas ressonâncias podem se degenerar em uma única ressonância, em função das dimensões dos anéis trapezoidais. Ressalte-se ainda que essas equações são equações iniciais de projeto, servindo como uma primeira etapa para um processo de otimização.

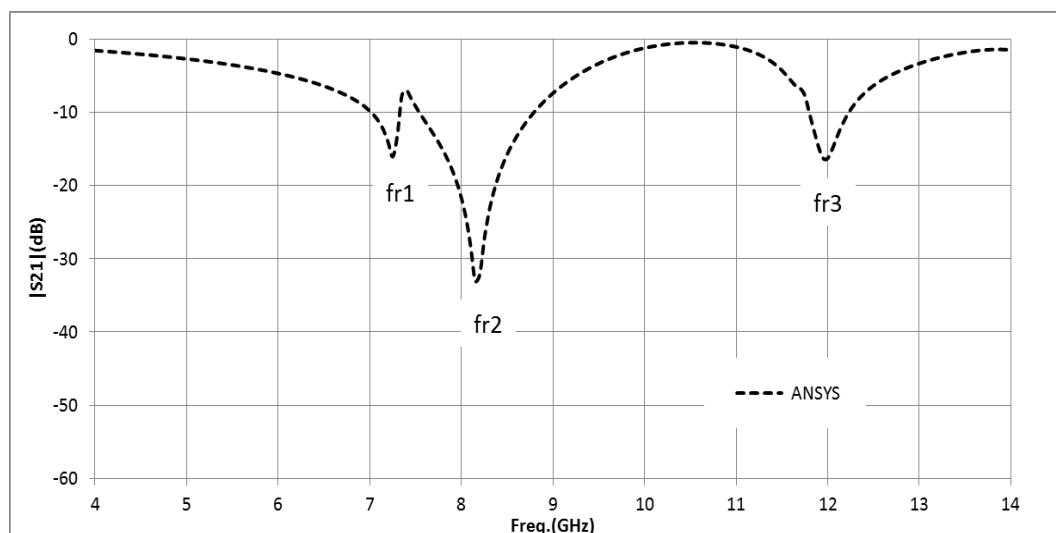
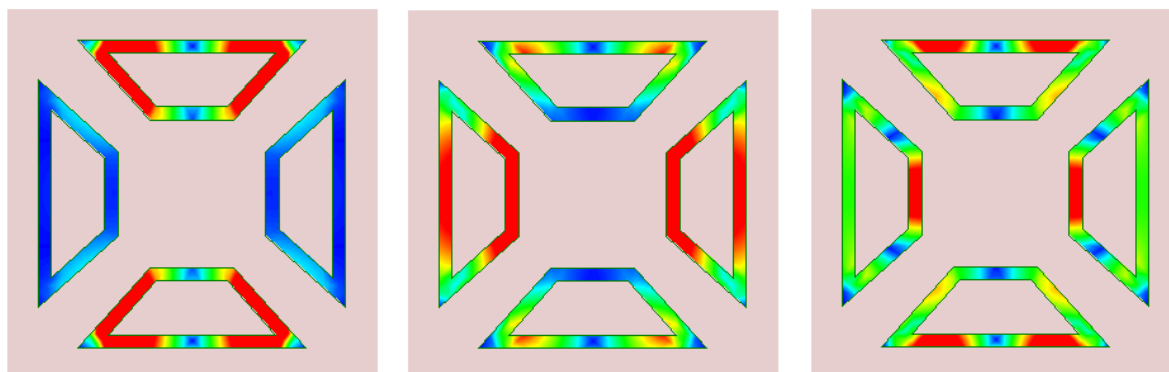


Figura 3-11 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) x frequência (GHz), anéis trapezoidais, $h = 1$ mm, $\epsilon_r = 4,4$.



a) $fr1 = 7,25$ GHz,
 $J_{m\acute{a}x.} 0,10$ A/m²

b) $fr2 = 8,15$ GHz
 $J_{m\acute{a}x.} 0,05$ A/m²

c) $fr3 = 12,00$ GHz,
 $J_{m\acute{a}x.} 0,08$ A/m²

Figura 3-12 - Distribuição da densidade de corrente (J, A/m²) para diferentes frequências de ressonâncias, polarização E_y .

$$fr1(\text{GHz}) = \frac{0,3}{l1ef\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (23)$$

$$fr2(\text{GHz}) = \frac{0,3}{l2ef\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (24)$$

Sendo

$\epsilon_{ref} = \epsilon_{ref-CPW}$ é a constante dielétrica efetiva para um guia de onda coplanar (CPW, *coplanar wave guide*) sem o plano terra [com $S=10 \times h$, que pode ser facilmente calculado usando um dos softwares disponíveis [58], [59];

l_{1ef} é o comprimento médio do anel trapezoidal, cuja base maior é perpendicular à direção do campo elétrico;

l_{2ef} corresponde a duas vezes o comprimento médio da base maior do anel trapezoidal, cuja base maior é paralela à direção do campo elétrico;

Ainda considerando a geometria do exemplo, da Figura 3-9, os valores calculados pelas equações (23) e (24), são $fr1 = 7,02 \text{ GHz}$ e $fr2 = 8,50 \text{ GHz}$. Note que essa faixa de frequência abrange as frequências de ressonância, calculadas pela simulação numérica, 7,25 GHz e 8,15 GHz.

3-3-Geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais

Neste caso, as duas geometrias são associadas, Figura 3-13, procurando preservar a resposta em frequência de cada uma separadamente. Naturalmente, dependendo das dimensões, da faixa de frequência, entre outros fatores, pode ocorrer um acoplamento entre as geometrias, modificando a resposta em frequência final.

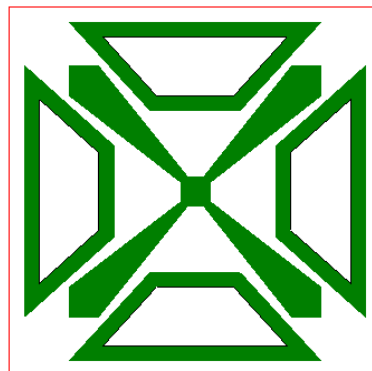


Figura 3-13 - Geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais.

Para exemplificar a resposta em frequência da geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais, seja considerada a superposição das

geometrias apresentadas nas Figuras 3-4 e 3-9, que corresponde à Figura 3-13, cuja resposta em frequência é apresentada na Figura 3-14. As três primeiras frequências de ressonância observadas são 3,25 GHz, 7,30 GHz e 8,90 GHz.

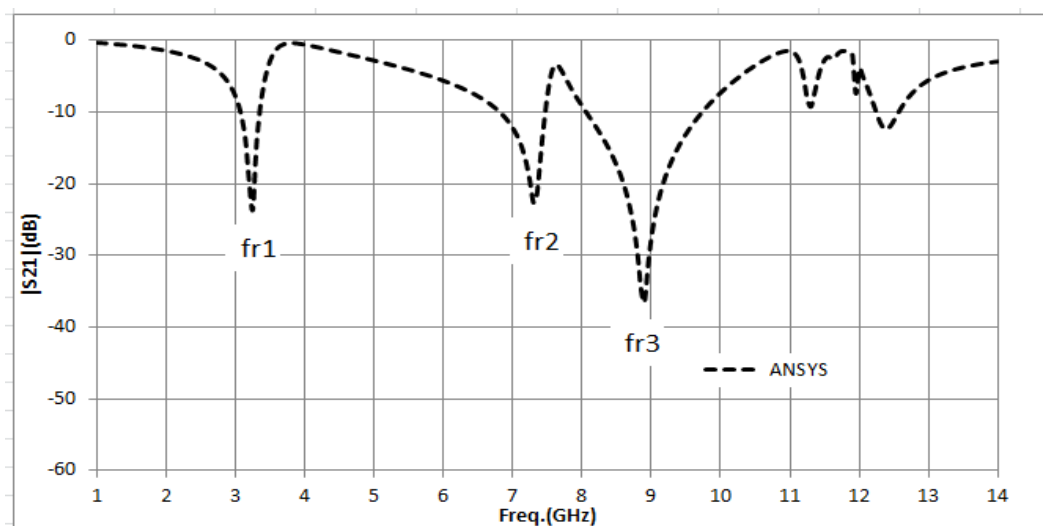
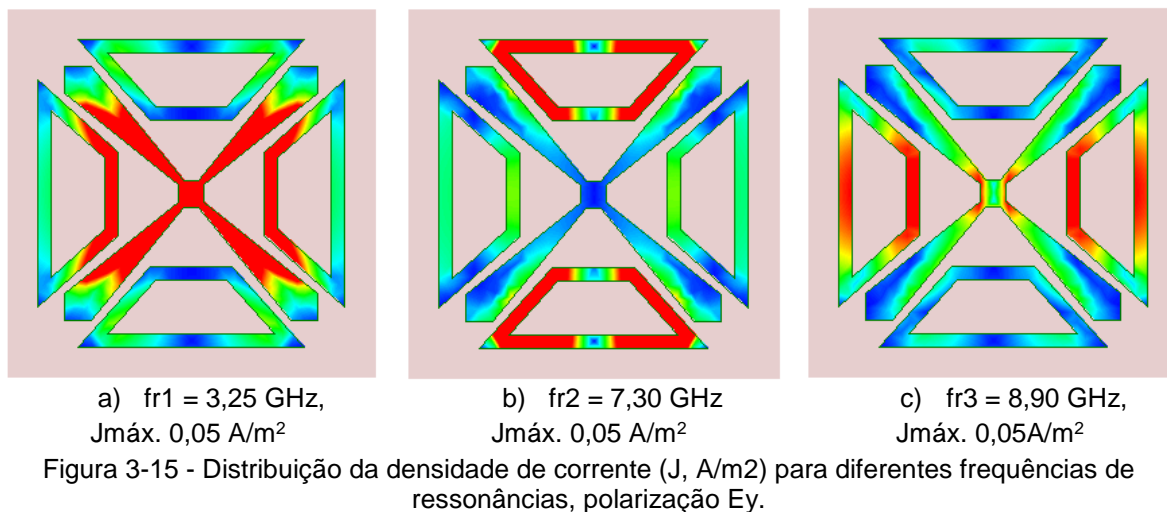


Figura 3-14 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) x frequência (GHz), estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais.

A primeira frequência de ressonância, 3,25 GHz, está associada à geometria estrela de quatro braços, o que fica mais evidente ao ser analisada a distribuição da densidade de corrente para essa frequência, Figura 3-15 (a). Provavelmente, a redução da frequência de ressonância de 4,10 GHz para 3,25 GHz, se deve ao acoplamento entre a estrela de quatro braços e os anéis trapezoidais verticais.

A segunda frequência de ressonância, 7,30 GHz está associada aos anéis trapezoidais horizontais, como pode ser observado na Figura 3-15 (b). Como, para essa frequência, quase não há acoplamento entre os anéis e a estrela, a frequência de ressonância permanece praticamente a mesma da geometria sem a estrela de quatro braços, ou seja, 7,25 GHz.

A terceira frequência de ressonância ocorre em 8,90 GHz e está associada aos anéis trapezoidais verticais. Neste caso, percebe-se um acoplamento entre os anéis trapezoidais verticais e a estrela de quatro braços, Figura 3-15 (c), deslocando para cima a frequência de ressonância, quando comparada aos anéis trapezoidais sem a presença da estrela de quatro braços (8,15 GHz).



Diante do exposto, verifica-se que é possível modificar as frequências de ressonância de maneira quase que independente, alterando apenas a geometria principal, responsável por essa ressonância. No próximo capítulo são apresentados os resultados numéricos e experimentais obtidos e os ajustes da resposta em frequência realizados.

4- RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Os resultados numéricos e experimentais estão divididos em dois grupos. No primeiro, são considerados apenas os anéis trapezoidais. No segundo grupo, é considerada geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais. A geometria estrela de quatro braços não é estudada isoladamente, pois, conforme citado anteriormente, esse estudo já fez parte de outros trabalhos.

4-1-Geometria anéis trapezoidais

Para exemplificar os procedimentos propostos nesta dissertação, são apresentados resultados numéricos e experimentais para FSS com geometria baseada em anéis trapezoidais. Foi considerado um substrato de baixo custo FR-4, com 1,0 mm de espessura, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas de 0,02. A geometria considerada para a célula unitária é apresentada na Figura 3-6, repetida aqui como Figura 4-1, para facilitar a leitura. Note que a geometria é simétrica.

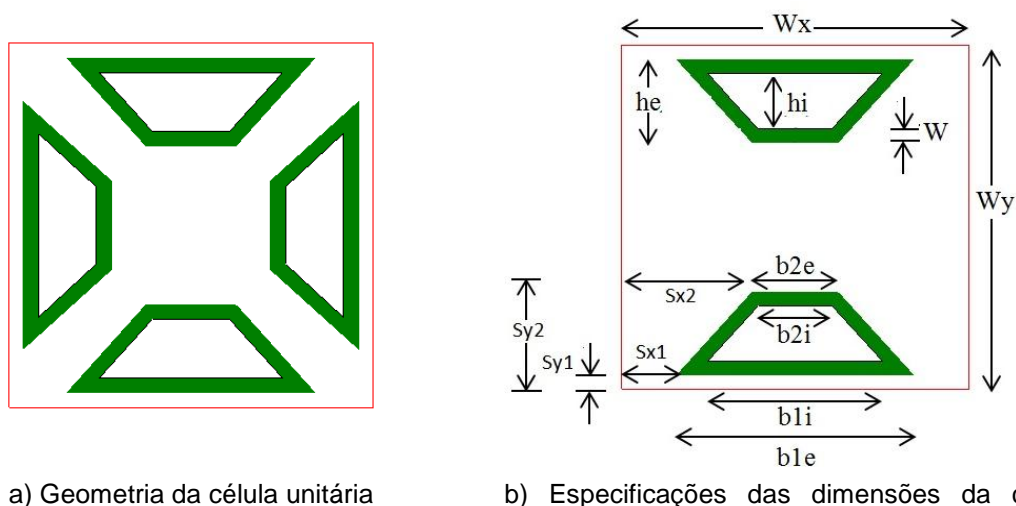


Figura 4-1 - Geometria da célula unitária, anel trapezoidal.

Foram projetadas e fabricadas 5 FSS, ilustradas na Figura 4.2, cujas dimensões são detalhadas na Tabela 4-1.

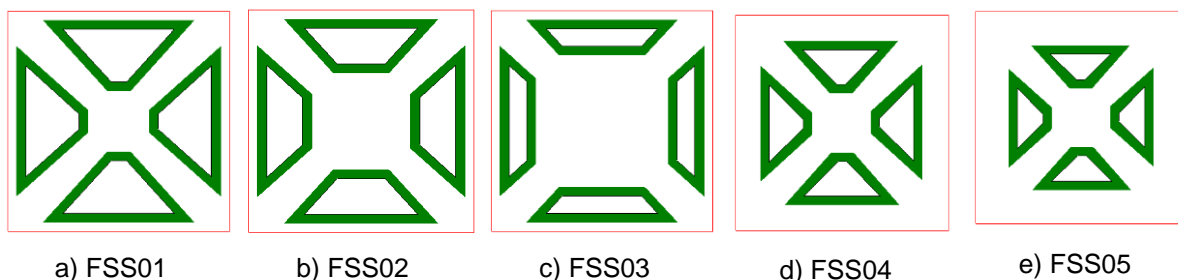


Figura 4-2 - Geometria da célula unitária das FSS projetadas e fabricadas.

Tabela 4-2 - Dimensões (mm) básicas para as FSS projetadas e fabricadas, $W_x = W_y = 25$ mm, $W = 1$ mm.

| | Sx1 | Sy1 | Sx2 | Sy2 | b1e | b1i | b2e | b2i | he | hi |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| FSS01 | 4,0 | 1,0 | 11,2 | 9,0 | 17,0 | 12,5 | 2,6 | 1,7 | 8,0 | 6,0 |
| FSS02 | 4,0 | 1,0 | 9,4 | 7,0 | 17,0 | 12,5 | 6,2 | 5,3 | 6,0 | 4,0 |
| FSS03 | 4,0 | 1,0 | 7,6 | 5,0 | 17,0 | 12,5 | 9,8 | 8,9 | 4,0 | 2,0 |
| FSS04 | 5,8 | 3,0 | 11,2 | 9,0 | 13,4 | 8,9 | 2,6 | 1,7 | 6,0 | 4,0 |
| FSS05 | 6,7 | 4,0 | 11,2 | 9,0 | 11,6 | 7,1 | 2,6 | 1,7 | 5,0 | 3,0 |

As FSSs apresentam um número total de 64 células, 8×8 elementos, cada um com 25 mm \times 25 mm, o que corresponde a uma dimensão total de 200 mm \times 200 mm, Figura 4-3. Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o programa computacional comercial ANSYS® (*Designer*™) [60], baseado no Método dos Momentos. Os resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA-IFPB, utilizando um analisador de redes Agilent E5071C e dois pares de antenas tipo corneta, Figura 4-4. Tanto para resultados medidos como para resultados numéricos, foi considerada apenas a polarização y.

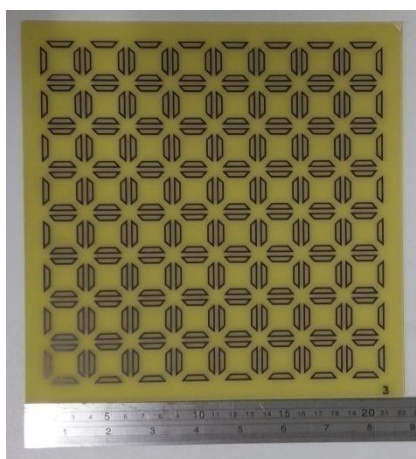


Figura 4-3 - Fotografia da FSS03.

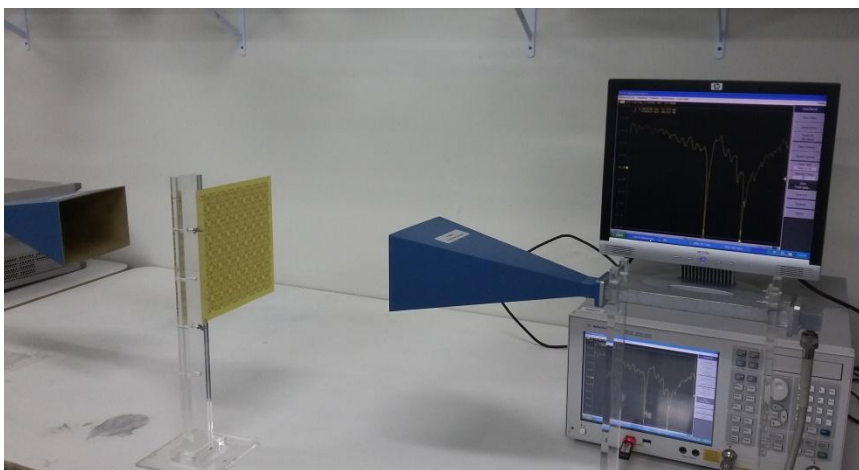


Figura 4-4 - Configuração dos equipamentos utilizados na medição.

Na Figura 4-5 é apresentada a resposta em frequência para a FSS01, observando-se uma boa concordância entre os resultados medidos e numéricos. Nos resultados medidos são observadas três ressonâncias: 6,91 GHz, 7,97 GHz e 10,99 GHz. Praticamente, para as mesmas frequências são observados os valores numéricos, 6,80 GHz, 8,00 GHz e 10,99 GHz. Contudo, ressalta-se que a intensidade das ressonâncias é sistematicamente maior para os valores medidos. A comparação entre os valores das ressonâncias medidas e simuladas é apresentada na Tabela 4-2. Note que os valores obtidos com as equações (23) e (24) apresentam uma diferença menor que 10%, considerando as duas primeiras ressonâncias, o que é uma boa aproximação para uma posterior otimização numérica.

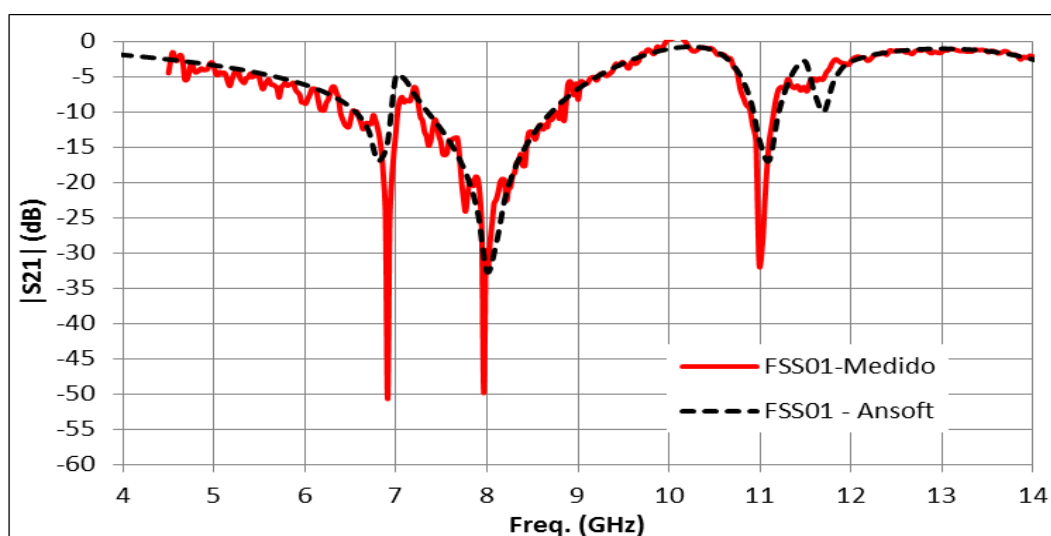


Figura 4-5 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS01

Nas Figuras 4-6 e 4-7 são apresentadas as respostas em frequência para as FSS02 e FSS03, respectivamente, observando-se uma boa concordância entre os resultados medidos e numéricos. Note que a frequência de ressonância relativa ao anel trapezoidal gradativamente “se desloca em direção” à frequência de ressonância do anel trapezoidal de base paralela ao campo elétrico, degenerando-se em praticamente uma única ressonância. Para a FSS02 ainda é viável identificar as ressonâncias distintas (f_{r1} e f_{r2}), o que praticamente não é possível para a FSS03.

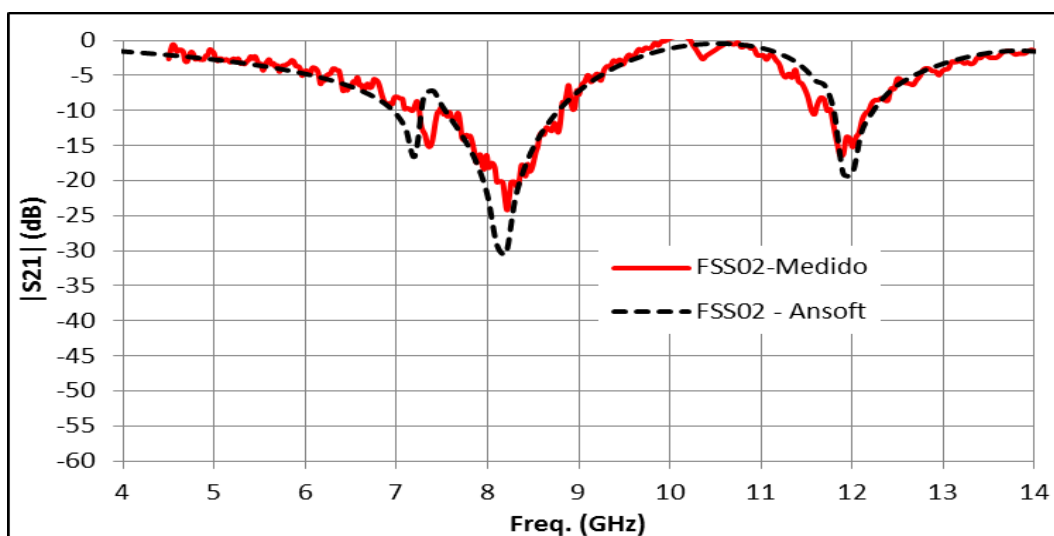


Figura 4-6 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS02.

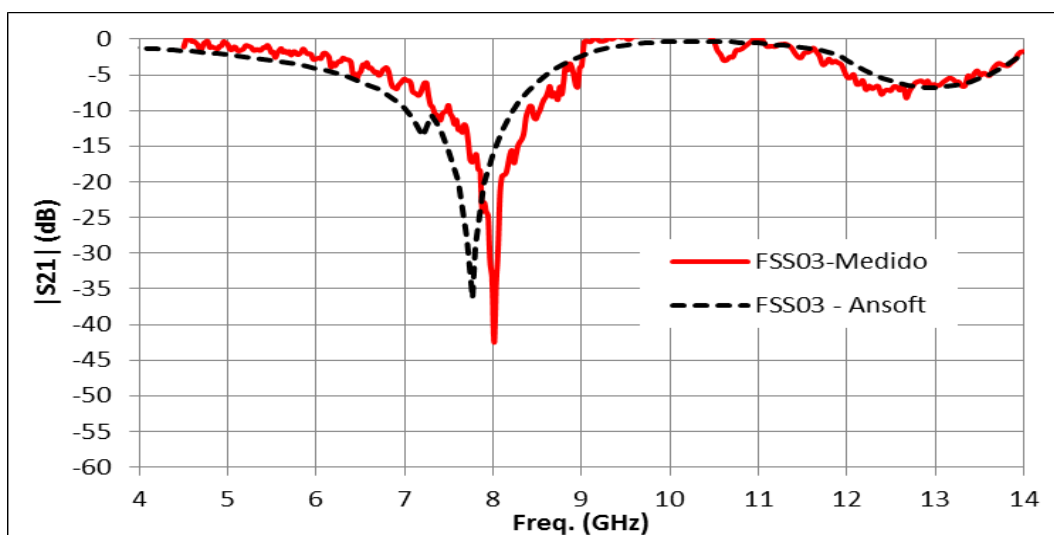


Figura 4-7 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS03.

Nas Figuras 4-8 e 4-9 são apresentadas as respostas em frequência para as FSS04 e FSS05, respectivamente. Novamente, se observa uma boa concordância

entre os resultados medidos e numéricos. Note que nestes casos observa-se apenas a frequência de uma ressonância, provavelmente relativa à degeneração das duas primeiras frequências de ressonância. Na Figura 4-10 é apresentada a distribuição da densidade de corrente para a FSS04, na frequência de 10,33 GHz, verificando-se a excitação dos quatro anéis, o que indica a degeneração das duas primeiras ressonâncias. Comparando-se os valores medidos com os valores obtidos com a equação (23), as diferenças se mantêm abaixo de 10%.

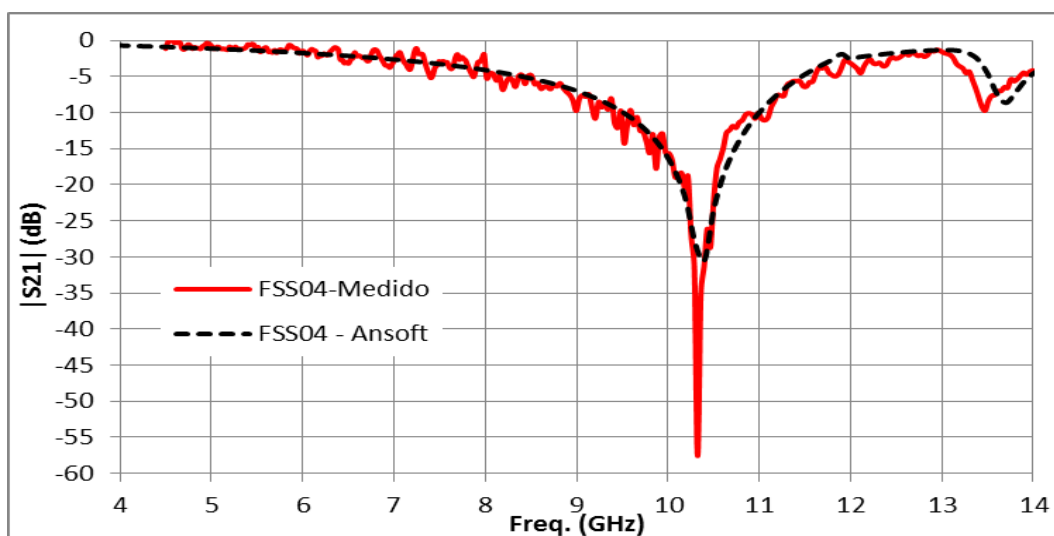


Figura 4-8 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS04.

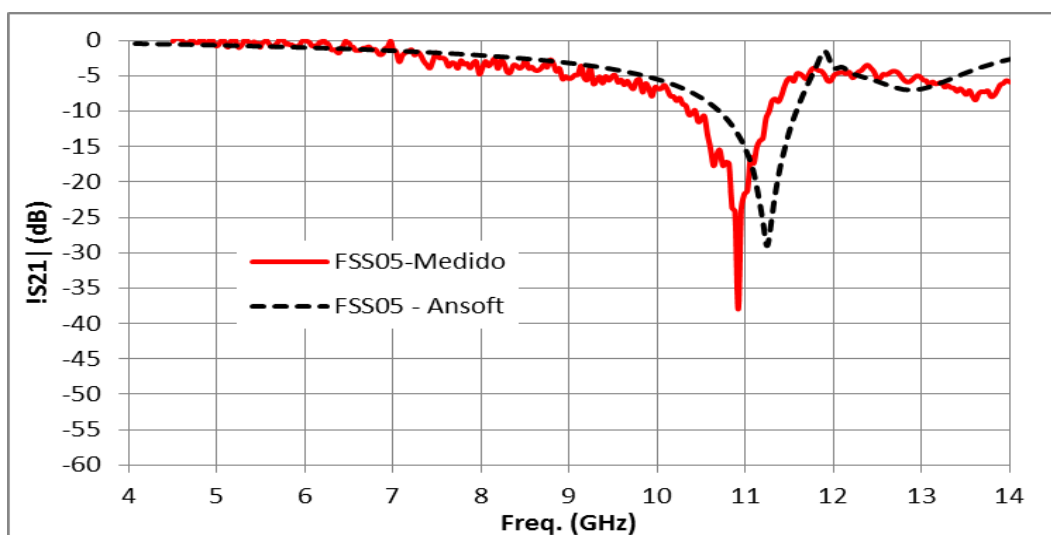


Figura 4-9 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS05.

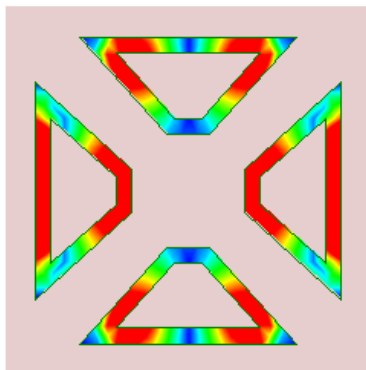


Figura 4-10 - Distribuição da densidade de corrente (J, A/m²), $J_{\text{máx.}} = 0,05 \text{ A/m}^2$, para a FSS04, em 10,33 GHz, polarização E_y .

Tabela 4-3-Comparação dos resultados obtidos para as frequências de ressonância.

| | FSS01 | FSS02 | FSS03 | FSS04 | FSS05 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|----------|-----------|
| $fr1$ (GHz), medido | 6,91 | 7,36 | | | |
| $fr2$ (GHz), Ansoft | 6,80 | 7,18 | 7,20 | | |
| $fr1$ (GHz), Eq. (23) | 7,02 | 7,39 | 7,80 | 9,37 | 11,26 |
| <i>DifAnsoft/medido (%)</i> | 1,6 | 2,4 | | | |
| <i>DifEq.(23) /medido (%)</i> | 1,6 | 0,4 | | | |
| $fr2$ (GHz), medido | 7,97 | 8,10 | 8,01 | 10,33 | 10,92 |
| $fr2$ (GHz), Ansoft | 8,00 | 8,20 | 7,76 | 10,33 | 11,24 |
| $fr2$ (GHz), Eq. (24) | 8,50 | 8,50 | 8,50 | 11,24 | 13,40 |
| <i>DifAnsoft/medido (%)</i> | 0,4 | 4,9 | 3,2 | 0,0 | 2,8 |
| <i>DifEq.(24) /medido (%)</i> | 6,6 | 3,7 | 6,1 | 9,3/8,8* | 3,1/22,7* |
| $fre3$ (GHz), medido | 10,99 | 11,87 | | | |
| $fre3$ (GHz), Ansoft | 11,10 | 12,00 | | | |
| <i>DifAnsoft/medido (%)</i> | 1,0 | 1,1 | | | |

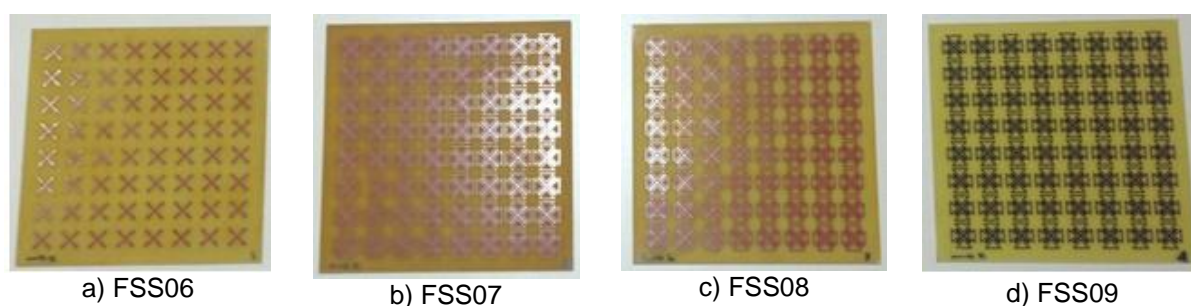
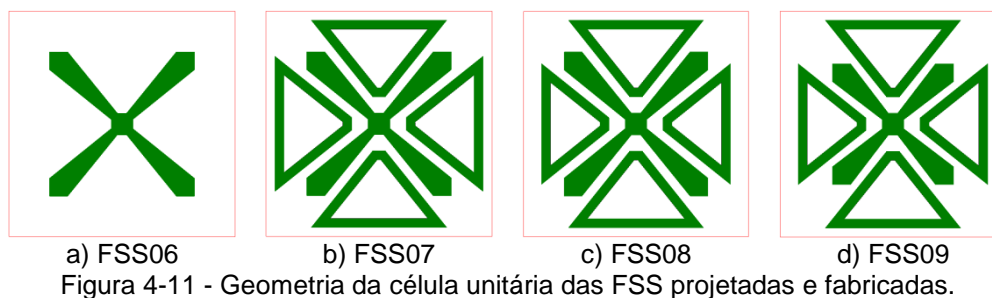
*Diferença % em relação às equações (23) e (24)

4-2-Geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais

Nesta seção são apresentados os resultados numéricos e experimentais para a geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais. Inicialmente é caracterizada a geometria estrela de quatro braços e, na sequência, são apresentados resultados para essa geometria associada a anéis trapezoidais. Foi considerado um substrato de baixo custo FR-4, com 1,5 mm de espessura, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas de 0,02. Analogamente à seção 4-1, os resultados numéricos foram obtidos utilizando o software Ansys Designer e os

resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA-IFPB.

Foram projetadas e fabricadas 4 FSS, ilustradas na Figura 4-11. As FSS apresentam um número total de 64 células, 8 × 8 elementos, cada um com 25 mm × 25 mm, o que corresponde a uma dimensão total de 200 mm × 200 mm, Figura 4-12.



Inicialmente foi projetada uma FSS com geometria estrela de quatro braços, FSS06, cujos detalhes da geometria são apresentados na Figura 4-13 e as dimensões na Tabela 4-3. As respostas em frequência dessa FSS são apresentadas na Figura 4-14, polarização x, e 4-15, polarização y. Como esperado, devido à simetria da geometria, os resultados para as duas polarizações são praticamente os mesmos, verificando-se ainda uma concordância muito boa entre resultados medidos e simulados. A primeira frequência de ressonância calculada a partir da equação (1) é de 4,69 GHz, menos de 1% de diferença quando comparada aos resultados medidos, 4,72 GHz, e simulado, 4,7 GHz, o que é um resultado com boa aproximação. Para efeito de análise dos resultados, a segunda ressonância, em torno de 11,00 GHz, não será considerada.

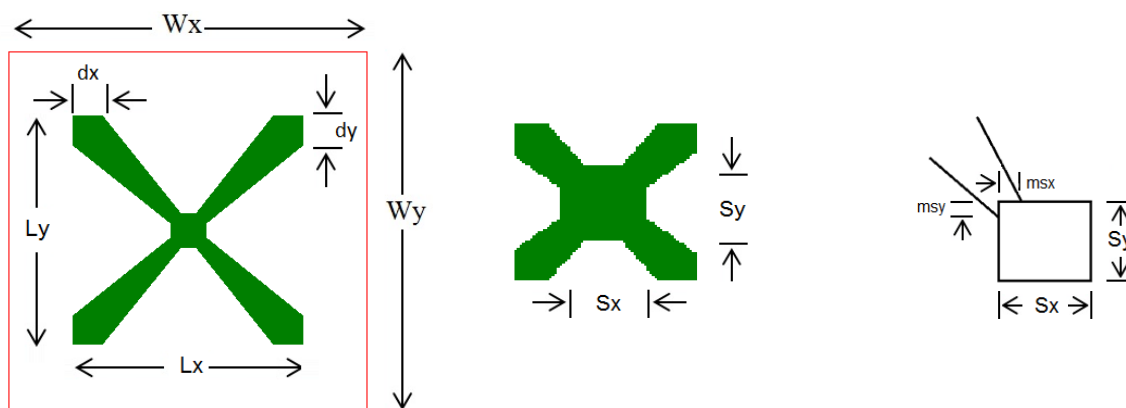


Figura 4-13 - Detalhes da geometria da FSS06.

Tabela 4-4 - Dimensões (mm) básicas para as FSS projetadas e fabricadas, $W_x = W_y = 25$ mm, $W = 1$ mm.

| | FSS06 | FSS07 | FSS08 | FSS09 |
|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Lx | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 13,0 |
| Ly | 16,0 | 16,0 | 16,0 | 13,0 |
| dx | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| dy | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| Sx | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 |
| Sy | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 |
| msx | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| msy | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Sx1 | - | 5,0 | 5,0/5,8* | 5,0/5,8* |
| Sy1 | - | 1,0 | 1,0/2,0* | 1,0/2,0* |
| Sx2 | - | 11,8 | 11,8 | 11,8 |
| Sy2 | - | 9,5 | 9,5 | 9,5 |
| b1e | - | 15,0 | 15,0/13,4* | 15,0/13,4* |
| b1i | - | 10,8 | 10,8/9,2* | 10,8/9,2* |
| b2e | - | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| b2i | - | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| he | - | 8,5 | 8,5/7,5* | 8,5/7,5* |
| hi | - | 6,5 | 6,5/5,5* | 6,5/5,5* |

* As dimensões correspondem ao trapézio vertical, deslocado para a horizontal.

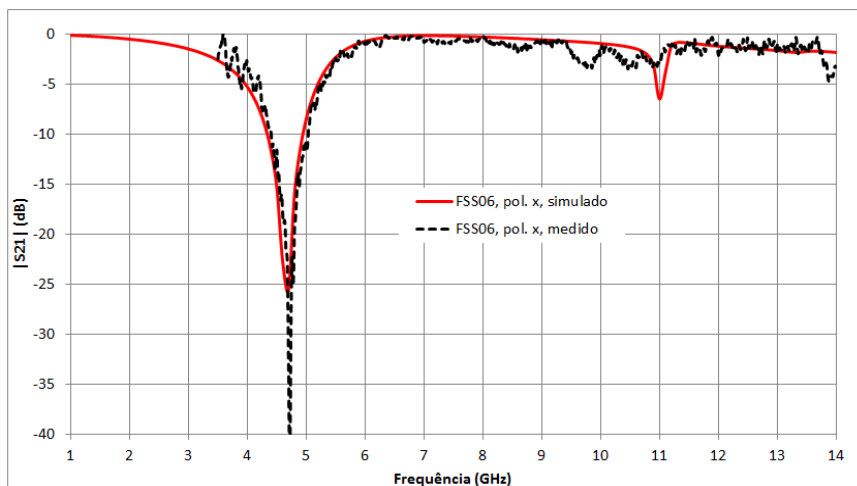


Figura 4-14 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS06, polarização x.

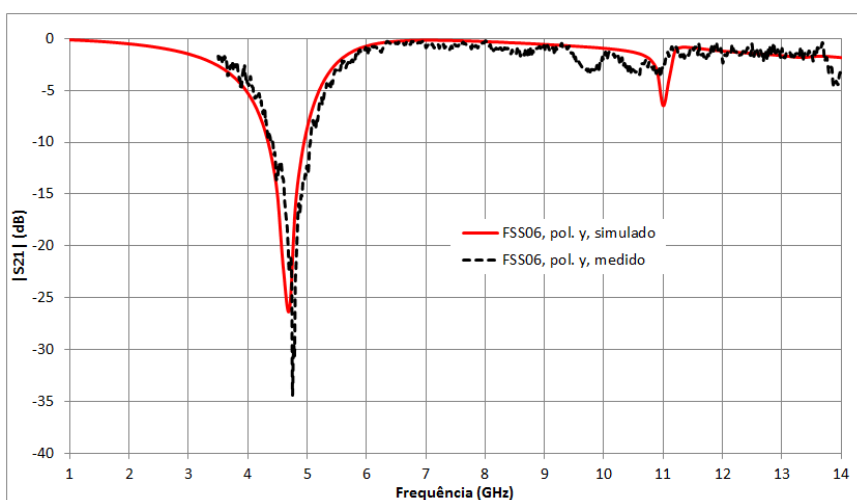


Figura 4-15-Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS06, polarização y.

A FSS07 é uma estrutura simétrica, cujas dimensões são descritas na Tabela 4-3. As respostas em frequência para as polarizações x e y são apresentadas nas Figuras 4-16 e 4-17, respectivamente. Como esperado, essas respostas são praticamente as mesmas. Observa-se uma boa concordância entre os resultados simulados e medidos, com uma maior diferença na terceira ressonância, menor que 4%, de 8,28 GHz, medido, para 8,60 GHz, simulado. As frequências de ressonância são resumidas na Tabela 4-4.

A primeira frequência de ressonância está associada à geometria estrela de quatro braços e, como previsto na seção 3-3, sofre uma redução no seu valor, quando comparado ao valor da estrela de quatro braços isolada, de 4,70 GHz para 4,00 GHz. Destaque-se ainda que essa frequência de ressonância é praticamente independente da polarização.

A segunda frequência de ressonância, 7,19 GHz / 7,10 GHz (polarização x/polarização y), está associada ao anel trapezoidal cuja base é perpendicular à direção do campo elétrico. Note que esse valor apresenta uma diferença da ordem de 6,9% quando comparado ao valor obtido pela equação (23), 7,59 GHz, devendo ser destacada que a equação (23) é para a primeira frequência do anel trapezoidal isolado.

A terceira frequência de ressonância, 8,33 GHz / 8,28 GHz (polarização x/polarização y), está associada ao anel trapezoidal cuja base é paralela à direção do campo elétrico. Comparado com o valor da equação (24), observa-se uma diferença da ordem de 17,3%. Entretanto, essa diferença decorre de um acoplamento mais elevado entre o anel trapezoidal e a estrela de quatro braços.

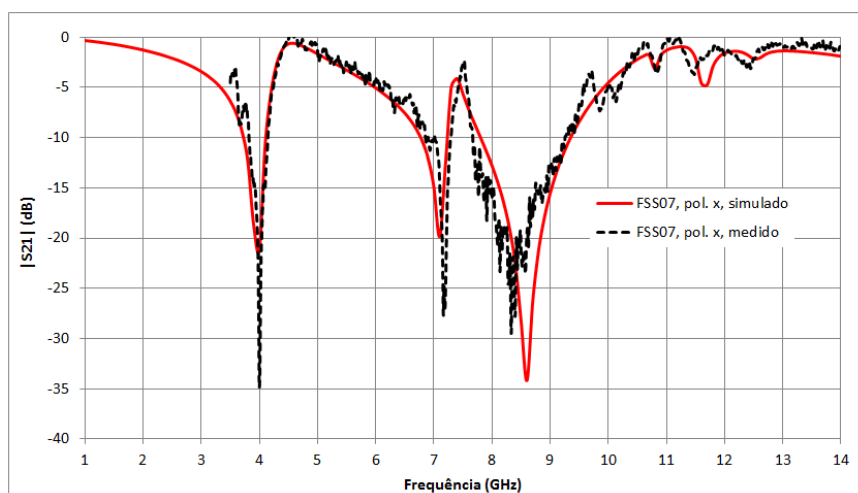


Figura 4-16 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS07, polarização x.

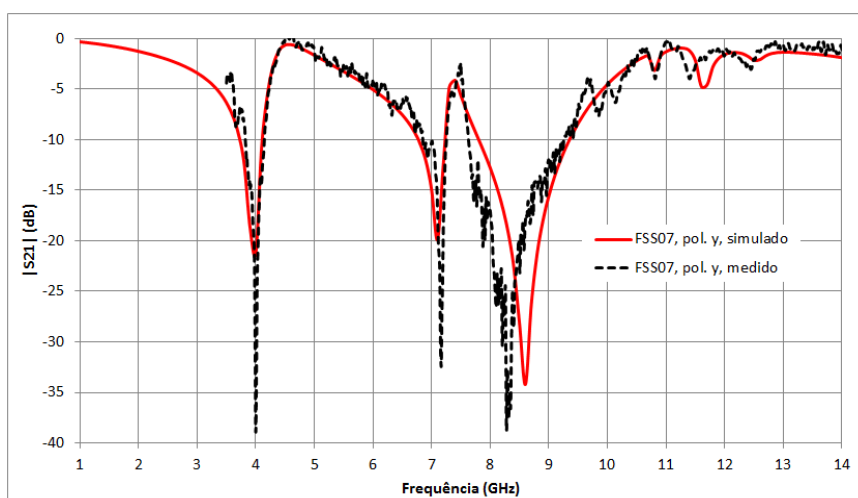


Figura 4-179 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS07, polarização y.

A FSS08 apresenta os anéis trapezoidais verticais com uma base maior, menor que os anéis trapezoidais horizontais. O objetivo aqui é que a segunda e a terceira ressonância sejam convertidas em uma única ressonância. Naturalmente, isso ocorrerá para apenas uma das polarizações, no caso a polarização x. Suas dimensões são descritas na Tabela 4-3 e as respostas em frequência para as polarizações x e y são apresentadas nas Figuras 4-18 e 4-19.

A primeira frequência de ressonância permanece praticamente a mesma quando comparada à FSS07, sendo independente da polarização, visto que a geometria estrela de quatro braços não foi alterada.

Para a polarização x, a segunda frequência de ressonância se deslocou, degenerando-se com a terceira frequência de ressonância, gerando uma única ressonância, 8,56 GHz / 8,79 GHz (medido/simulado), conforme esperado. Ressalte-se aqui que o valor previsto pela equação (23) é de 8,68 GHz, uma boa concordância.

Para a polarização y, observa-se praticamente a mesma resposta da polarização y da FSS07, com um pequeno deslocamento para maior, da segunda e da terceira frequência de ressonância.

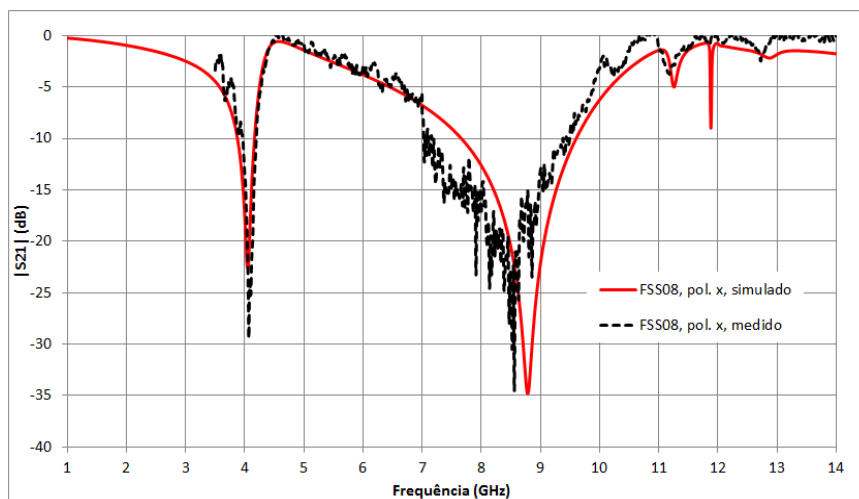


Figura 4-18 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS08, polarização x.

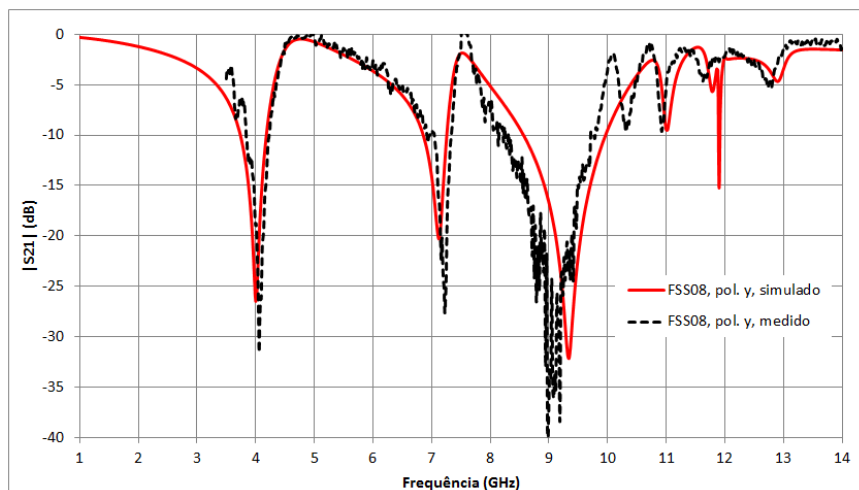


Figura 4-19 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS08, polarização y.

A FSS09 apresenta os mesmos anéis trapezoidais da FSS08, sendo reduzido o comprimento dos braços da estrela de quatro braços, de 16 mm para 13 mm. O objetivo agora é verificar se é possível alterar a primeira frequência de ressonância, modificando o mínimo possível as demais. Destaque-se ainda que as modificações da primeira frequência de ressonância serão, praticamente, independentes da polarização. Suas dimensões são descritas na Tabela 4-3 e as respostas em frequência para as polarizações x e y são apresentadas nas Figuras 4-20 e 4-21.

A primeira frequência de ressonância se deslocou de 4,00 para 4,66 GHz / 4,70 GHz (medido/simulado), como previsto. De maneira semelhante à FSS07, essa frequência de ressonância é menor do que a prevista para a estrela isolada, calculada pela equação (1), 5,77 GHz.

Comparando as demais ressonâncias da FSS09 com a FSS08, observa-se praticamente o mesmo resultado, com um pequeno deslocamento para maior, o que se justifica pelo acoplamento entre as diferentes partes da geometria.

Portanto, constata-se que é possível modificar a primeira frequência de ressonância sem alterar as demais.

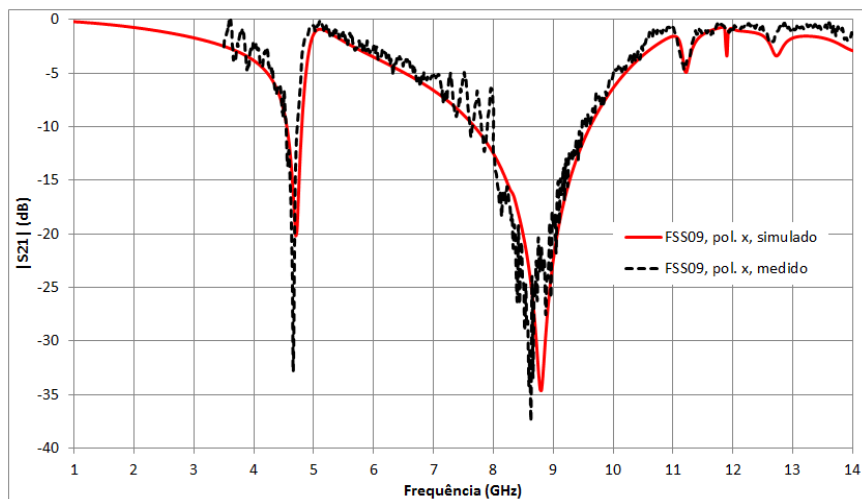


Figura 4-20 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS09, polarização x.

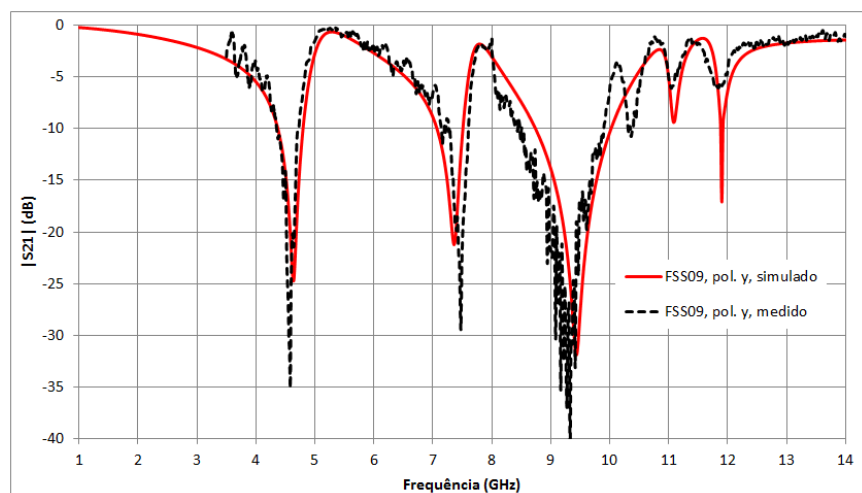


Figura 4-21 - Resposta em frequência, $|S_{21}|$ (dB) \times Freq. (GHz), para FSS09, polarização y.

Tabela 4-5 - Frequências de ressonância.

| | FSS06 pol. x | FSS06 pol. y | FSS07 pol. x | FSS07 pol. y | FSS08 pol. x | FSS08 pol. Y | FSS09 pol. X | FSS09 pol. y |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| fr1(GHz), medido | 4,72 | 4,75 | 4,00 | 4,00 | 4,07 | 4,06 | 4,66 | 4,58 |
| fr1(GHz), simulado | 4,70 | 4,70 | 4,00 | 4,00 | 4,06 | 4,00 | 4,70 | 4,64 |
| fr2(GHz), medido | - | - | 7,19 | 7,10 | - | 7,22 | - | 7,48 |
| fr2(GHz), simulado | 11,0 | 11,0 | 7,16 | 7,10 | - | 7,12 | - | 7,36 |
| fr3(GHz), medido | - | - | 8,33 | 8,28 | 8,56 | 8,78 | 8,63 | 9,44 |
| fr3(GHz), simulado | - | - | 8,60 | 8,60 | 8,79 | 9,34 | 8,80 | 9,44 |

5-CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1-Considerações finais

Este trabalho teve por objetivo apresentar a caracterização de uma superfície seletiva em frequência, baseada na geometria estrela de quatro braços associada a anéis trapezoidais.

Durante o trabalho foram observados os comportamentos numérico e experimental da FSS. Na caracterização numérica foram obtidos resultados a partir do método dos momentos (MoM), utilizando o *software Ansys DesignTM*. Foram considerados para os resultados numéricos e experimentais as polarizações x e y , com incidência da onda eletromagnética normal à FSS e verificou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

Foi possível verificar que as geometrias estrela de quatro braços e anéis trapezoidais apresentam campos eletromagnéticos praticamente desacoplados, o que possibilita o ajuste separado da resposta em frequência associada à respectiva geometria. Como uma possível aplicação desta característica, foi deslocada uma ressonância indesejada, obtendo-se uma operação em banda dupla.

Foram apresentadas equações iniciais de projeto para a frequência de ressonância, tanto para a geometria estrela de quatro braços, como para os anéis trapezoidais, verificando-se uma diferença menor que 10%, quando comparados os resultados aos experimentais e obtidos numericamente com o programa Ansys Designer. Foram fabricadas e caracterizadas numericamente e experimentalmente 9 nove) FSS, observando-se uma boa concordância entre os resultados obtidos.

5.2-Trabalhos futuros

A geometria estudada neste trabalho apresenta características que a torna potencialmente atrativa para diversas aplicações, instigando a continuidade desta pesquisa. Como trabalhos futuros, podem ser citados:

- Aplicar a geometria desenvolvida para um caso específico, como, por exemplo, bloqueio de sinais em 2,4 GHz e 5,8 GHz;

- Comparar numericamente outros métodos de simulação, a exemplo do WCIP, e softwares comerciais como HFSS, CST;
- Investigar o efeito da utilização de uma FSS ativa utilizando a geometria proposta.
- Estudar possibilidades de direcionamento da pesquisa para contextos específicos, além da segurança de redes de computadores, sistemas de posicionamento e radio navegação, indústrias automobilísticas, naval, aeronáutica e segurança de ambientes confidenciais.
- Aplicar a geometria proposta em antenas inteligentes;

REFERÊNCIAS

- [1] P. F. Drucker, **Administrando em Tempos de Grandes Mudanças**, 2 ed. São Paulo, Pioneira, 1995.
- [2] M. Castells, **A Sociedade em Rede**, Vol1, 13ª ed. São Paulo, Paz e Terra, 2007.
- [3] Disponível em: <http://www.asianic.com.ph/product/tenda-3g611r>, consultado em: 06/03/2016.
- [4] A. Clegg and A. Weisshaar Eason, "Future radio spectrum access," vol. 102, No. 3, *Proceedings of the IEEE*, pp. 239–241, March 2014.
- [5] ITU, "The impact of broadband on the economy: research to date and policy issues," April, 2012. Disponível em www.itu.int/broadband, consultado em 04/02/2016.
- [6] S. Riess, J. Brendel, A. Stoeckle, R. Rose and G. Fischer, "Components and implementation of a spectrum sensing network for the UHF TV Band," *Microwave Conference (EuMC)*, European, Nuremberg, pp. 1091-1094, 2013.
- [7] J. Bae et al., "Spectrum markets for wireless services," *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, DySPAN, 3rd IEEE Symposium on, Chicago, IL, pp. 1-10, 2008.
- [8] Nieremberg José Pereira de Lyra Ramos, **Caracterização de Antena Tipo Refletor de Canto Utilizando Superfícies Seletivas em Frequência**, João Pessoa, PB, IFPB, Dissertação de Mestrado, 2016.
- [9] Ludek Subrt, Pavel Pechac, Andrea Vallecchi, Lee Ford, Richard Langley, Jonathan Rigelsford, "Advanced modelling of intelligent walls for indoor smart environments," in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, Hague, Netherlands, April 6–11, 2014, pp. 620–622.
- [10] Marios Raspopoulos and Stavros Stavrou, "Frequency selective buildings through frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 8, pp. 2998–3005, August, 2011.
- [11] Ghaffer I. Kiani, Kenneth L. Ford, Lars G. Olsson, Karu P. Esselle, and Chinthana 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, February, 2010.

- [12] Jiayin Roberts, **Design of a Secure Electromagnetic Building**, PhD. Thesis, The University of Sheffield, Sheffield, UK, 2014.
- [13] In-Gon Lee, Ie-Pya Hong, "Frequency selective surface design for blinds applications," *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Gothenburg, Sweden, April 8–12, 2013, pp. 2753–2755.
- [14] Mats Gustafsson, Anders Karlsson, António Pedro Pontes Rebelo, and Björn 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.
- [15] Josiel do Nascimento Cruz, **Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta**, João Pessoa, PB, IFPB, Dissertação de Mestrado, 2015.
- [16] Isaac S. S. Lima, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de Estrela de Quatro Braços**, João Pessoa, PB, IFPB, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [17] T. K. Wu, **Frequency-Selective Surface and Grid Array**, Wiley, New York, 1995.
- [18] B. A. Munk, **Frequency Selective Surfaces – Theory and Design**, Wiley, 2000.
- [19] J. C. Vardaxoglou, **Frequency Selective Surfaces – Analysis and Design**, Research Studies Press, England, 1997.
- [20] Antônio L. P. S. Campos, **Superfícies Seletivas em Frequência – Análise e Projeto**, Natal-RN, IFRN Editora, 2009.
- [21] Hillner de Paiva Almeida Ferreira, **Matrioska: Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas**, João Pessoa-PB: IFPB, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [22] Alfredo Gomes Neto, Adaildo G.DAssunção Junior, Jefferson Costa e Silva, André Nascimento da Silva, Hillner de P. A. da Ferreira and Isaac S. S. Lima, "A proposed geometry for multi-Resonant frequency selective surfaces", In: *European Microwave Week 2014 Conference/44th Europe na Microwave Conference (EuMC)*, *European Microwave*, Roma, 2014
- [23] Leidiane Carolina Martins de Moura, **Caracterização de FSS com Geometria Estrela de Quatro Braços Tipo Fenda**, João Pessoa, PB: IFPB, Dissertação de Mestrado, julho, 2015.

- [24] Alfrêdo Gomes Neto, Joabson N. de Carvalho, André N. da Silva, Hillner de P. A. Ferreira, Isaac S. S. Lima and Jefferson I. Fernandes, "Four arms star: an useful geometry for switchable FSS," in *Proceedings of the 2013 SBMO/IEEE MTT-S Micro wave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Rio de Janeiro, RJ, 2013, pp. 1-5.
- [25] Alfredo Gomes Neto, Jefferson Costa e Silva, Joabson Nogueira de Carvalho, Andrécia P. da Costa, and Leidiane Carolina M. de Moura, "Bandpass frequency selective surface using asymmetrical slot four arms star geometry," *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 58, p. 1105-1109, 2016.
- [26] André Nascimento Silva, **Caracterização de FSS com Geometria em Forma de U**, João Pessoa, PB: IFPB, Dissertação de Mestrado, abril, 2014.
- [27] Alfrêdo Gomes Neto, Jefferson Costa e Silva, Joabson Nogueira de Carvalho, André Nascimento da Silva, Cecília Burle de Aguiar, Deisy Formiga Mamedes, "Analysis of frequency selective surface with up-shaped geometry," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 14, p. 113-121, 2015.
- [28] J. Romeu and Y. Rahmat-Samii, "Fractal FSS: A novel dual-band frequency selective surface," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 7, pp. 1097-1105, Jul 2000.
- [29] 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.
- [30] E. E. C. Oliveira, P. H. F. Silva, A. L. P. S. Campos e A. G. d'Assunção, "Small-size quase-fractal patch antenna using the Minkowskicurve," *Microwave and Opt. Tech. Letters*, vol.52, no.4, 2010.
- [31] 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.
- [32] D. B. Webb, E. Michielssen, e R. Mittra, "Thick frequency selective surfaces," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest*, 1992, pp. 1795–1798 vol.4.

- [33] K. Elmahgoub, F. Yang, Z. A. Elsherbeni, Design of Novel Reconfigurable Frequency Selective Surfaces with Two Control Techniques. *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 35, pp. 135-145, 2013.
- [34] S. N. Azemi, K. Ghorbani and W. S. T. Rowe, "Mechanically tunable and reconfigurable FSS using spring loaded ring resonators," *Microwave Conference (EuMC), 2013 European*, Nuremberg, pp. 932-935, 2013.
- [35] A. Mansoul, F. Ghanem, M. R. Hamid and M. Trabelsi, "A selective frequency-reconfigurable antenna for cognitive radio applications," *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 13, pp. 515-518, 2014
- [36] B. Sanz-Izquierdo and E. Parker, "Dual polarized reconfigurable frequency selective surfaces," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 62, n. 2, pp.764-771, 2014.
- [37] Oleksandr Sushko, Melusine Pigeon, Theo Kreouzis, Clive Parini, Robert Donnan, Rostyslav Dubrovka, "Low-cost inkjet-printed FSS band-pass filters for 100 and 300 GHz," *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Davos, Switzerland, April, 2016, pp. 1-3.
- [38] Y. Rahmat-Samii and A. N. Tulintseff, "Diffraction analysis of frequency selective reflector antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.41, n. 4, pp. 476-487, 1993.
- [39] Partha Pratim Sarkar, "Frequency selective surfaces: Development and prospect," *Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT), 2015 Third International Conference on. IEEE*, West Bengal, February 2015.
- [40] R. Dubrovka, J. Vazquez, C. Parini and D. Moore, "Equivalent circuit method for analysis and synthesis of frequency selective surfaces," In *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings*, vol.153, n. 3, pp. 213-220, 2006.
- [41] 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, n. 5, pp. 1340-1349, 2008.
- [42] Adaildo Gomes D'Assunção Júnior, Glaucio Fontgalland, Mohammed Titaouine, Henri Baudrand, Alfrêdo Gomes Neto, "Analysis of quasi-square open ring frequency selective surface using the wave concept iterative

- procedure,” In *Proceedings of the 2009 SBMO/IEEE MTT-S Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Belém, PA, 2009, pp. 735-740.
- [43] W. C. Gibson, **The Method of Moments in Electromagnetics**, New York, USA: Chapman & Hall /CRC, 2008.
- [44] Matthew N.O. Sadiku, **Numerical Techniques in Electromagnetics with MATLAB**, Third Edition, Florida, USA: CRC Press, 2009.
- [45] J. L Volaskis, A. Chatterjee, and L. C. Kempel, **Finite Element Method for Electromagnetics, Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications**, Florida, USA: Wiley-IEEE Press, 1998.
- [46] T. Itoh, G. Pelosi and P. P. Silvester, **Finite Element Software for Microwave Engineering**, New York: Wiley, 1996.
- [47] P. Harms, R. Mittra and 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, August 2002.
- [48] M. Titaouine, N. Raveu, A. G. Neto, and H. Baudrand, **The WCIP method: Theory and applications**, *Advances in Engineering Research*, vol. 6, pp. 143-176, December 2008.
- [49] M. Titaouine, A. G. Neto, H. Baudrand, and F. Djahli, “WCIP method applied to active frequency selective surfaces,” *Journal of Microwave, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 6, pp. 1-16, 2007.
- [50] F. Bayatpur, **Metamaterial-Inspired Frequency-Selective Surfaces**, Tese de Doutorado. The University of Michigan, 2009
- [51] ESA, Microwave Material RF Characterization Setup, http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/09/Microwave_Material_RF_Characterization_setup. [Online]. [Acesso em 28 de agosto de 2016].
- [52] Alfrêdo Gomes Neto e Jefferson Ideião Fernandes, “Análise numérica do efeito do corte triangular em motivos retangulares de FSS,” Projeto PIBITI, Edital n° 04/2011, IFPB, 2011.
- [53] Alfrêdo Gomes Neto e Jefferson Ideião Fernandes, “Caracterização experimental do efeito do corte triangular em motivos retangulares de FSS,” Projeto PIBITI, Edital n° 09/2012, IFPB, 2012.

- [54] Alfrêdo Gomes Neto, Adaildo Gomes D'Assunção Junior, Jefferson Costa e Silva, Isaac Silva Sousa Lima, Leidiane Carolina Martins de Moura, Rafaela Gomes Gonçalves de Carvalho. "Ajuste da resposta em frequência de fss com geometria estrela de quatro braços," In: *MOMAG2014, 2014*, CURITIBA, PR. CURITIBA, PR, 2014. p. 606-609.
- [55] Alfrêdo Gomes Neto, Jefferson C. e Silva, Andrécia P. da Costa, João Batista de O. Silva, and Leidiane Carolina M. de Moura, Custódio Peixeiro, "Band pass FSS with slot four arms star geometry," In: *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference 2015, 2015*, Porto de Galinhas, 2015, v. 1.
- [56] Andrécia Pereira da Costa, **Implementação de uma Superfície Seletiva em Frequência Reconfigurável Baseada na Geometria Estrela de Quatro Braços**, João Pessoa, PB: IFPB, Dissertação de Mestrado, setembro, 2016.
- [57] Alfrêdo Gomes Neto, Emmanuel Benoît Jean-Baptiste Dupouy, Andrécia Pereira da Costa, Deisy Formiga Mamedes, Matheus Souza Onofre, "Superfície seletiva em frequência ativa baseada na geometria estrela de quatro braços," In: *MOMAG 2016 - 12º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo 17º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica*, 2016, Porto Alegre, RS, 2016. v. 1. p. 1-6.
- [58] Microwaves101, [Online]. Available: <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/calcpw.cfm>. [Acesso em 4 Maio 2015].
- [59] AppCAD, [Online]. Available: <http://www.hp.woodshot.com>. [Acesso em 4 Maio 2015].
- [60] <http://www.ansys.com/Products/Electronics>