



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Raclenir Lopes Galvão Júnior

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA
DE ESTRUTURAS FSS COM INSERÇÃO DE GEOMETRIAS
INSPIRADAS EM EBG NA FAIXA DO 5G**

MOSSORÓ

2025

Raclenir Lopes Galvão Júnior

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA
DE ESTRUTURAS FSS COM INSERÇÃO DE GEOMETRIAS
INSPIRADAS EM EBG NA FAIXA DO 5G**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito final para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade,
Prof. Dr.

Co-orientador: Ruann Victor de Andrade Lira,
Prof. Dr.

MOSSORÓ

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

G Galvão Júnior, Raclenir Lopes.
182e Estudo do comportamento da resposta em
frequência de estruturas FSS com inserção de
geometrias inspiradas em EBG na faixa do 5G /
Raclenir Lopes Galvão Júnior. - 2025.
145 f. : il.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade.
Coorientador: Ruann Victor de Andrade Lira.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica, 2025.

1. Telecomunicações. 2. Superfícies Seletivas em
Frequência. 3. FSS. 4. EBG. 5. Tecnologia 5G. I.
Andrade, Humberto Dionísio de, orient. II. Lira,
Ruann Victor de Andrade, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Raclenir Lopes Galvão Júnior

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA
DE ESTRUTURAS FSS COM INSERÇÃO DE GEOMETRIAS
INSPIRADAS EM EBG NA FAIXA DO 5G**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito final para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado.

Defendida em: 27/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **HUMBERTO DIONISIO DE ANDRADE**
Data: 27/08/2025 12:22:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade, Presidente da Banca e Orientador (UFERSA)

Documento assinado digitalmente
 **RUANN VICTOR DE ANDRADE LIRA**
Data: 27/08/2025 22:01:42-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Ruann Victor de Andrade Lira, Coorientador (UFERSA)

**Idalmir de Souza
Queiroz Júnior**

Assinado de forma digital por
Idalmir de Souza Queiroz Júnior
Dados: 2025.08.27 19:32:13 -03'00'

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior, Examinador interno (UFERSA)

Documento assinado digitalmente
 **FRANCISCO MAGNO MONTEIRO SOBRINHO**
Data: 27/08/2025 17:27:36-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Francisco Magno Monteiro Sobrinho, Examinador externo (SENAI-RN)

DEDICATÓRIA

*À minha filha amada, Ana Lis, que me fez
conhecer e sentir o verdadeiro amor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Pai eterno pelo dom da vida e por todas as possibilidades que existem neste plano e no próximo.

Agradeço a meus pais pelo amor oferecido, pela minha formação e por todos os ensinamentos e valores de vida;

Agradeço a minha esposa, Camila Miryan, pelo amor, paciência, companheirismo e pelo meu maior presente em vida que é a nossa filha amada, Ana Lis.

Agradeço aos meus demais familiares pela confiança, amor e sentimento de importância, sem os quais a jornada da vida seria extremamente difícil.

Agradeço ao meu orientador e querido amigo, Professor Dr. Humberto Dionísio, pelos inúmeros conselhos acadêmicos e de vida, pela amizade sincera, pelo conhecimento repassado e por acreditar na elaboração do presente trabalho.

Agradeço à UFERSA e as suas instalações laboratoriais, bem como a todos os docentes envolvidos no Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica – PPGEE, por toda a dedicação e cooperação durante esse período de mestrado.

Agradeço a todos os colegas que lutaram essa batalha comigo, sempre presentes nos laboratórios do CITED, pela colaboração e ajuda durante a execução das etapas deste trabalho, em especial aos colegas: Artur, Emerson, Leonardo e Nickson.

ÉPIGRAFE

“Vamos amigo, lute! Vamos amigo, lute!
Vamos amigo, lute! Vamos amigo, ajude!
Senão a gente acaba perdendo o que já
conquistou, a gente acaba perdendo o que já
conquistou”.

Edson Gomes

RESUMO

Com a demanda crescente por novas tecnologias associadas aos sistemas de telecomunicações, sobretudo nas modernas estruturas de redes móveis (tecnologia 5G) que visem obter sistemas cada vez mais eficientes, confiáveis e de maior aplicabilidade na sociedade atual, as Superfícies Seletivas em Frequência (FSS) entram nesse contexto por serem estruturas planares de baixo custo, relativa facilidade na confecção e aplicação e que apresentam comportamentos de filtragem na resposta em frequência de acordo com suas características próprias. Algumas pesquisas recentes envolvendo as estruturas eletromagnéticas de bandas proibidas (EBG) destacam possíveis aplicações dessas estruturas em soluções envolvendo as FSS. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo de investigação comparativo paramétrico do comportamento da resposta em frequência de estruturas FSS com características rejeita-faixa de geometria simples e associadas a diferentes configurações de redes/malhas 3x3 retangulares inspiradas em EBG com aplicabilidade na faixa de frequência da tecnologia 5G. As malhas EBG são arranjadas no substrato dielétrico fazendo-se variar algumas propriedades dos furos: diâmetro, posição, altura e volume ocupado no substrato dielétrico. O projeto das FSS seguiu o Método de Circuito Equivalente e foram realizadas simulações das estruturas com o objetivo de otimizá-las utilizando o *software ANSYS HFSS*[®]. Os resultados das simulações e medições, considerando incidência normal e as polarizações TE (vertical) e TM (horizontal), mostraram que a altura do substrato dielétrico e a aplicação de malhas/redes inspiradas em EBG influenciam a frequência de ressonância e a largura de banda das estruturas FSS estudadas. O aumento na altura do substrato reduz a frequência e estreita a banda, enquanto a inserção das malhas/redes aumenta esses parâmetros, sofrendo influência da posição dos furos existentes e que crescem com o aumento do diâmetro deles. A densidade de corrente variou conforme a polarização e a presença das malhas. Os resultados confirmam que estruturas inspiradas em EBG são eficazes para ajustar características de FSS, úteis em filtros e controle de ondas eletromagnéticas.

Palavras-chave: Telecomunicações, Superfícies Seletivas em Frequência, FSS, EBG, Polarização, Tecnologia 5G, Ondas Eletromagnéticas.

ABSTRACT

With the growing demand for new technologies associated with telecommunication systems, especially in modern mobile network structures (5G technology) aimed at achieving increasingly efficient, reliable, and widely applicable systems in today's society, Frequency Selective Surfaces (FSS) stand out as planar structures that are low-cost, relatively easy to manufacture and apply, and exhibit filtering behaviors in their frequency response according to their own characteristics. Recent research involving Electromagnetic Band Gap (EBG) structures highlights potential applications of these structures in solutions involving FSS. This work aims to conduct a comparative parametric investigation of the frequency response behavior of simple reject-band geometry FSS structures and associated with different configurations of 3x3 rectangular EBG-inspired meshes applicable in the 5G frequency band. The EBG meshes are arranged on the dielectric substrate varying some hole properties: diameter, position, height, and volume occupied within the substrate. The FSS design followed the Equivalent Circuit Method, and simulations were performed to optimize the structures using ANSYS HFSS® *software*. Simulation and measurement results, considering normal incidence and TE (vertical) and TM (horizontal) polarizations, showed that the dielectric substrate height and the application of EBG-inspired meshes influence the resonance frequency and bandwidth of the studied FSS structures. Increasing the substrate height reduces the resonance frequency and narrows the bandwidth, while the insertion of meshes increases these parameters, affected by the hole positions and increasing with hole diameter. Current density varied according to polarization and mesh presence. The results confirm that EBG-inspired structures are effective for fine-tuning FSS characteristics, useful in filters and electromagnetic wave control applications.

Keywords: Telecommunications, Frequency Selective Surfaces, FSS, EBG, Polarization, 5G Technology, Electromagnetic Waves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) FSS do tipo metálico, (b) Resposta em frequência.....	24
Figura 2 – (a) FSS do tipo abertura, (b) Resposta em frequência.	25
Figura 3 – Exemplos de formas comuns de elementos FSS: (a) Grupo 1, (b) Grupo 2, (c) Grupo 3, (d) Grupo 4.....	26
Figura 4 – Relação do tipo do elemento da FSS com sua resposta em frequência: (a) FSS filtro passa-baixa, (b) FSS filtro passa-alta (c) FSS filtro rejeita-faixa (d) FSS filtro passa-faixa....	27
Figura 5 – Sistema de medições em uma FSS.....	29
Figura 6 – Sistema de medições com uso de lentes em uma FSS.	30
Figura 7 – Representação de uma rede de duas portas usando parâmetros de espalhamento. .	32
Figura 8 – FSS utilizada na porta de um forno de micro-ondas comum.....	35
Figura 9 – FSS utilizada em antena refletora.	36
Figura 10 – Radome utilizando uma FSS.....	36
Figura 11 – Estrutura PBG tridimensional adotada na metodologia de Yablonovitch (1991).	40
Figura 12 – Classificação das estruturas EBG: (a) 1D, (b) 2D, (c) 3D.	42
Figura 13 – Conceitos de célula primária, célula unitária e estrutura periódica.	43
Figura 14 – Exemplos de geometria das redes EBG: (a) quadrada, (b) triangular, (c) hexagonal.....	44
Figura 15 – Relação de preenchimento de estruturas EBG.	46
Figura 16 – Evolução das redes móveis de comunicação.	48
Figura 17 – Cenários de uso da tecnologia 5G.....	50
Figura 18 – Projeto das estruturas FSS espira quadrada (a) referência e (b) substrato triplicado.....	55
Figura 19 – Projeto das estruturas FSS espira quadrada com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 3mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.	56
Figura 20 – Projeto das estruturas FSS espira quadrada com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 4mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.	56

Figura 21 – Projeto das estruturas FSS espira quadrada com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 5mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.	56
Figura 22 – Projeto das estruturas FSS anel circular (a) referência e (b) Substrato triplicado.	56
Figura 23 – Projeto das estruturas FSS anel circular com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 3mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.	57
Figura 24 – Projeto das estruturas FSS anel circular com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 4mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.	57
Figura 25 – Projeto das estruturas FSS anel circular com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 5mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.	58
Figura 26 – Projeto das estruturas FSS dipolo cruzado (a) referência e (b) Substrato triplicado.	58
Figura 27 – Projeto das estruturas FSS dipolo cruzado com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 3mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.	58
Figura 28 – Projeto das estruturas FSS dipolo cruzado com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 4mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.	59
Figura 29 – Projeto das estruturas FSS dipolo cruzado com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 5mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.	59
Figura 30 – Estruturas FSS adotadas como padrão de referência devidamente confeccionadas, a saber: (a) FSS espira quadrada, (b) FSS anel circular e (c) dipolo cruzado.	60
Figura 31 – Furadeira elétrica tipo CNC (Comando Numérico Computadorizado) utilizada para a execução das furações de todas as malhas/redes inspiradas em EBG deste trabalho.	61
Figura 32 – Malhas/redes inspiradas em EBG propostas neste trabalho devidamente confeccionadas onde: (a) furos com diâmetro de 3mm, (b) furos com diâmetro de 4mm, (c) furos com diâmetro de 5mm e (d) sem furos.	62
Figura 33 – Setup de medição devidamente montado e em processo de execução de medição.	63
Figura 34 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) da FSS espira quadrada de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 3mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	65

Figura 35 – Coeficiente de transmissão (S21) da FSS espira quadrada de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 4mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	66
Figura 36 – Coeficiente de transmissão (S21) da FSS espira quadrada de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 5mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	67
Figura 37 – Coeficiente de transmissão (S21) da FSS anel circular de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 3mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	71
Figura 38 – Coeficiente de transmissão (S21) da FSS anel circular de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 4mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	72
Figura 39 – Coeficiente de transmissão (S21) da FSS anel circular de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 5mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	73
Figura 40 – Coeficiente de transmissão (S21) da FSS dipolo cruzado de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 3mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	77
Figura 41 – Coeficiente de transmissão (S21) da FSS dipolo cruzado de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 4mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	78
Figura 42 – Coeficiente de transmissão (S21) da FSS dipolo cruzado de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 5mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	78
Figura 43 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S21) da FSS espira quadrada com malha inspirada EBG na posição do meio (M) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	83
Figura 44 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S21) da FSS espira quadrada com malha inspirada EBG na posição final (F) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	84
Figura 45 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S21) da FSS espira quadrada com malha inspirada EBG de dupla camada (D) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	84
Figura 46 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S21) da FSS anel circular com malha inspirada EBG na posição do meio (M) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	85

Figura 47 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS anel circular com malha inspirada EBG na posição final (F) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.....	86
Figura 48 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS anel circular com malha inspirada EBG de dupla camada (D) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.....	86
Figura 49 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS dipolo cruzado com malha inspirada EBG na posição do meio (M) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	87
Figura 50 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS dipolo cruzado com malha inspirada EBG na posição final (F) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.....	88
Figura 51 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS dipolo cruzado com malha inspirada EBG de dupla camada (D) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.....	88
Figura 52 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS espira quadrada de referência, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.....	90
Figura 53 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS espira quadrada com substrato triplicado, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.	90
Figura 54 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS espira quadrada com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.	91
Figura 55 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS espira quadrada com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.	92
Figura 56 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS espira quadrada com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.	93
Figura 57 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS anel circular de referência, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.....	94
Figura 58 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS anel circular com substrato triplicado, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.	95

Figura 59 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS anel circular com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.	96
Figura 60 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS anel circular com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.	97
Figura 61 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS anel circular com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.	98
Figura 62 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS dipolo cruzado de referência, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.	99
Figura 63 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS dipolo cruzado com substrato triplicado, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.	100
Figura 64 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS dipolo cruzado com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.	100
Figura 65 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS dipolo cruzado com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.	102
Figura 66 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS dipolo cruzado com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.	103
Figura 67 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada de referência para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	104
Figura 68 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com substrato triplicado para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	105
Figura 69 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	106

Figura 70 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	106
Figura 71 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	107
Figura 72 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	107
Figura 73 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	108
Figura 74 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	108
Figura 75 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	109
Figura 76 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	110
Figura 77 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	110
Figura 78 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular de referência para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	114
Figura 79 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular com substrato triplicado para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	115
Figura 80 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	115
Figura 81 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	116

Figura 82 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.....	116
Figura 83 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	117
Figura 84 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	117
Figura 85 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.....	117
Figura 86 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	118
Figura 87 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	119
Figura 88 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.....	119
Figura 89 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS dipolo cruzado de referência para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	123
Figura 90 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com substrato triplicado para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	124
Figura 91 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.....	124
Figura 92 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	125
Figura 93 – Coeficiente de transmissão (S21) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.	125

Figura 94 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM. 126

Figura 95 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM. 126

Figura 96 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM. 127

Figura 97 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM. 127

Figura 98 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM. 128

Figura 99 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM. 128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões das estruturas FSS padrão e das variações das redes/malhas inspiradas em EBG.	53
Tabela 2 – Resultados simulados das respostas em frequência da FSS espira quadrada de referência, espira de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.	70
Tabela 3 – Resultados simulados das respostas em frequência da FSS anel circular de referência, anel de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.	76
Tabela 4 – Resultados simulados das respostas em frequência da FSS dipolo cruzado de referência, dipolo de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.	82
Tabela 5 – Resultados experimentais medidos das respostas em frequência da FSS espira quadrada de referência, espira de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.	113
Tabela 6 – Resultados experimentais medidos das respostas em frequência da FSS anel circular de referência, anel de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.	122
Tabela 7 – Resultados experimentais medidos das respostas em frequência da FSS dipolo cruzado de referência, dipolo de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.	131
Tabela 8 – Todos os resultados simulados e medidos das respostas em frequência das FSS e duas diversas configurações propostas neste trabalho.	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BW	–	<i>Bandwidth</i>
CNC	–	<i>Comando Numérico Computadorizado</i>
EBG	–	<i>Electromagnetic Band Gap</i>
eMBB	–	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
EMI	–	<i>Electromagnetic Interference</i>
FBG	–	<i>Fiber Bragg Gratings</i>
FDTD	–	<i>Finite-Difference Time Domain</i>
FEM	–	<i>Finite-Element Method</i>
FSS	–	<i>Frequency Selective Surfaces</i>
GSM	–	<i>Global System for Mobile communications</i>
IoT	–	<i>Internet of Things</i>
ISP	–	<i>Internet Service Provider</i>
ITU	–	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE	–	<i>Long Term Evolution</i>
MATLAB	–	<i>Matrix laboratory</i>
MCE	–	<i>Método do Circuito Equivalente</i>
MIMO	–	<i>Multiple Input, Multiple Output</i>
mMTC	–	<i>Massive machine-type communications</i>
MoM	–	<i>Method of Moments</i>
PBG	–	<i>Photonic Band Gap</i>
PCF	–	<i>Photonic Crystal Fiber</i>
PLS	–	<i>Physical Layer Security</i>
RCS	–	<i>Radar Cross Section</i>
RFID	–	<i>Radio Frequency Identification</i>
UMTS	–	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
URLLC	–	<i>Ultra-reliable and low-latency communications</i>
VNA	–	<i>Vector Network Analyzer</i>
WCIP	–	<i>Wave Concept Interactive Procedure</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivo geral.....	22
1.2 Objetivos específicos.....	22
2 REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 Superfícies Seletivas em Frequência	23
2.1.1 Abordagem histórica.....	23
2.1.2 Considerações conceituais iniciais	24
2.1.3 Forma dos elementos	25
2.1.4 Tipos dos elementos	27
2.1.5 Métodos de análise	28
2.1.6 Técnicas de medição.....	29
2.1.7 Principais parâmetros observados em estruturas FSS	30
a) Frequência de ressonância	30
b) Parâmetros de espalhamento (matriz S)	31
c) Largura de banda (BW)	32
d) Densidade de corrente elétrica.....	33
2.1.8 Aplicações	34
2.1.9 Estudo do estado da arte atual	37
2.2 Estruturas eletromagnéticas de bandas proibidas	39
2.2.1 Aspectos históricos e conceitos introdutórios	39
2.2.2 Características das estruturas.....	41
2.2.3 Redes e geometria.....	43
2.2.4 Frequência das estruturas EBG.....	45
2.2.5 Fator de preenchimento das estruturas EBG	45
2.3 Tecnologia 5G	46

2.3.1 Evolução das gerações de redes móveis	47
2.3.2 Características da tecnologia 5G	48
2.3.3 Classificação e cenários de uso da tecnologia 5G	49
3 MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 Pesquisa bibliográfica e estado da arte.....	51
3.2 Métodos de análise.....	52
3.3 Dimensionamento, modelagem e simulação	52
3.4 Análise de dados simulados e estudos paramétricos	59
3.5 Construção dos dispositivos simulados.....	60
3.6 Montagem e execução do <i>setup</i> de medição.....	63
3.7 Análise de dados medidos, estudos paramétricos e conclusões	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
4.1 Resultados simulados	65
4.2 Resultados experimentais.....	103
5 CONCLUSÕES.....	136
5.1 Sugestões de trabalhos futuros	137
REFERÊNCIAS.....	138

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a crescente demanda pelo uso de dispositivos de comunicação móveis é uma característica presente no mundo moderno (EMHEMED; JERBI; AHMED, 2021). Para isso se faz necessário enfrentar o complexo desafio tecnológico de aumentar as taxas de dados e reduzir a latência dos sistemas com o uso de bandas de frequências milimétricas das redes de comunicação sem fio 5G, sabendo lidar com suas vantagens e desvantagens, tendo em vista que as faixas de frequências utilizadas nos sistemas anteriores se encontram bastante congestionadas em virtude da grande quantidade de dispositivos conectados. O uso de Superfícies Seletivas em Frequência (FSS, do inglês *Frequency Selective Surfaces*) para essa faixa de ondas milimétricas podem ter aplicabilidade em redes 5G em virtude das suas características de filtragem (ABDOLLAHVAND; MARTINEZ-DE-RIOJA; ENCINAR; KATOCH, 2023).

As superfícies seletivas de frequência (FSS), consistem em arranjos periódicos formados por elementos metálicos condutores ou de abertura que apresentam características de filtragem das ondas eletromagnéticas no espaço livre para diferentes valores de frequência, sendo também chamadas de filtros espaciais, onde a resposta em frequência dessas estruturas são dependentes de algumas características, tais como: geometria, periodicidade, tipo dos elementos, características do substrato dielétrico, polarização da onda incidente, dentre outras. (MUNK, 2000; CAMPOS, 2008; GOMES NETO et al., 2020). As FSS são objeto de estudo de muitas décadas com variadas aplicações varrendo uma ampla faixa do espectro de frequência, tais como: refletores e radomes de antena, sub-refletores dicróicos, antenas de lente, controle de seção transversal de radar (RCS, do inglês *Radar Cross Section*), proteção eletromagnética, dentre outras (ANWAR; MAO; NING, 2018). O uso de FSS associadas com estruturas EBG (do inglês *Electromagnetic Band Gap*) tem sido investigado para suprimir a propagação de ondas eletromagnéticas que são frequências indesejadas (YU et al., 2015).

As estruturas EBG são arranjos periódicos (ou também não periódicos) aplicados em material dielétrico ou condutor, que possuem a capacidade de evitar (ou auxiliar) a propagação da onda eletromagnética em uma determinada faixa de frequência específica com estabilidade angular e de polarização, fornecendo uma banda passante e/ou banda de rejeição. Tais estruturas EBG têm tido aplicabilidade em diversas situações, sobretudo envolvendo estruturas planares, supressão de modos harmônicos (espúrios) e eliminação de ondas de superfície (HAJLAOUI; TRABELSI, 2016).

Neste trabalho é desenvolvido um estudo paramétrico comparativo entre estruturas FSS de elementos condutores (filtros rejeita-faixa) de geometria simples, a saber: espira quadrada, dipolo cruzado e anel circular; projetadas para operarem com aplicabilidade no espectro de frequência da tecnologia 5G, fazendo-se uso da inserção de diferentes malhas/redes de geometria inspirada do tipo EBG e variações na profundidade (altura) dos furos no substrato dielétrico, a fim de se evidenciar a resposta em frequência das diversas estruturas projetadas analisando os parâmetros essenciais utilizados no estudo das estruturas FSS, a saber: coeficiente de transmissão (S_{21}), frequência de ressonância (f_r), largura de banda (BW, do inglês *Bandwidth*) e densidade superficial de corrente elétrica (J) nas polarizações TE (polarização vertical) e TM (polarização horizontal). O estudo apresenta contribuições no campo da investigação relativo ao comportamento da inserção de estruturas EBG em estruturas planares FSS.

1.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho de Superfícies Seletivas em Frequência que operem com aplicabilidade no espectro de frequência da tecnologia 5G com diferentes estruturas inspiradas em EBG inseridas no substrato dielétrico atuando como filtros para ondas em propagação no espaço livre através de estudo paramétrico comparativo entre os diferentes projetos propostos.

1.2 Objetivos específicos

Para conseguir alcançar o objetivo geral são definidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Revisão da literatura e estudo do estado da arte do tema proposto;
- ii. Estudo sobre os métodos de análise adotados na literatura sobre FSS;
- iii. Projeto, modelagem e simulação das estruturas FSS usando o *software Ansoft HFSS®*;
- iv. Análise dos dados simulados e realização de estudo paramétrico sobre as FSS;
- v. Construção dos dispositivos propostos e suas variações;
- vi. Montagem e execução do *setup* de medição e validação dos dispositivos construídos;
- vii. Estudo comparativo entre os dados simulados, medidos e as devidas conclusões.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados conceitos e características importantes sobre as Superfícies Seletivas em Frequência (FSS), as estruturas Eletromagnéticas de Banda Proibida (EBG) e a tecnologia de comunicação 5G.

2.1 Superfícies Seletivas em Frequência

Neste tópico será descrito alguns aspectos históricos, bem como uma revisão da literatura trazendo princípios conceituais, as características e o estudo do estado da arte atual relacionados às Superfícies Seletivas em Frequência (FSS).

2.1.1 Abordagem histórica

No século 18, o físico americano David Rittenhouse estudando os fenômenos de difração ótica descobriu que algumas cores do espectro eletromagnético de luz eram eliminadas através de um lenço de seda quando estas eram verificadas a partir de uma fonte de iluminação proveniente de uma lâmpada em um poste (ALMEIDA, 2014). A explicação advém do fato de que cada superfície pode apresentar comportamentos de filtragem para faixas distintas de frequência das ondas incidentes. Rittenhouse então construiu um anteparo com fios com espaçamentos idênticos e posicionados em direção à luz, onde observou a filtragem da luz branca em determinada faixa de comprimentos de onda diferentes e espaçados igualmente em relação à linha central da luz branca, evidenciando que tal espaçamento dependia do espaçamento do anteparo construído. Dessa pesquisa nasceu a base conceitual das Superfícies Seletivas em Frequência, evidenciando que a resposta em frequência estava relacionada às dimensões do arranjo (MITTRA; CHAN; CWIK, 1988).

Desde os anos 60 que as FSS vêm sendo exaustivamente estudadas, indo desde geometrias simplificadas até projetos mais elaborados, contando com o suporte da evolução tecnológica das técnicas matemáticas analíticas, dos processos de fabricação e dos recursos computacionais. Potenciais aplicações no campo militar impulsionaram um avanço considerável nesse campo de pesquisa, resultando no desenvolvimento de subrefletores Cassegrain de antenas parabólicas, da tecnologia furtiva (do inglês *Stealth Technology*) utilizadas em aeronaves de ataque para reduzir a seção transversal de radar (RCS), radomes,

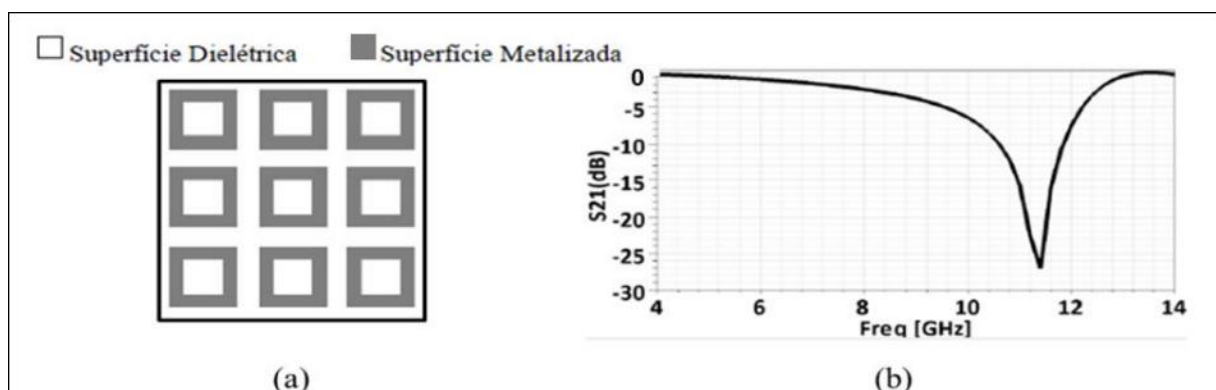
identificação por radiofrequência (RFID, do inglês *Radio Frequency Identification*), lentes especiais, blindagem EMI (do inglês *Electromagnetic Interference*), dentre outras aplicações (ANWAR; MAO; NING, 2018).

Já na década de 70 novas aplicações envolvendo as FSS foram encontradas, como o desenvolvimento de um subrefletor Cassegrain dicróico de banda dupla, ampliando as possibilidades das Superfícies Seletivas em Frequência (AGRAWAL; IMBRIALE, 1979). Nas décadas seguintes intensos estudos e pesquisas têm sido realizadas de forma constante e exaustiva, em virtude das potencialidades desse tipo de tecnologia em um amplo espectro de faixa de frequência e devido as características de filtragem. É notório que os estudos em FSS ainda se mantêm em crescimento e necessita de mais métodos e técnicas para dar suporte ao desenvolvimento de novas aplicações (ANWAR; MAO; NING, 2018).

2.1.2 Considerações conceituais iniciais

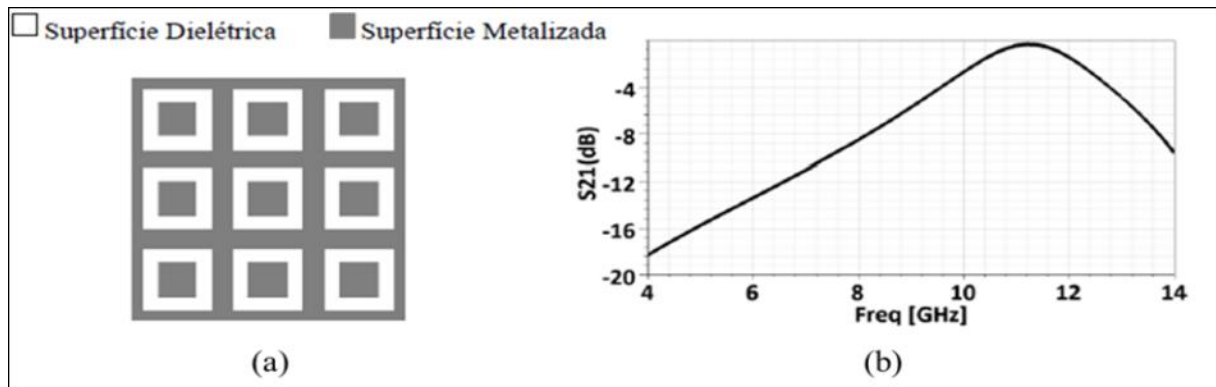
Uma Superfície Seletiva em Frequência (FSS) é uma estrutura constituída de um arranjo periódico tipicamente bidimensional que pode ser formada por elementos condutores metálicos (*patches*) ou de abertura (*slots*) e que exibem certas propriedades de filtragem para as ondas eletromagnéticas no espaço livre, sendo também chamadas de filtros espaciais. Quando os elementos condutores metálicos estão entrando em ressonância com a frequência da onda eletromagnética incidente, estas estruturas acabam funcionando como filtros do tipo rejeita-faixa enquanto as estruturas de abertura funcionam como filtros do tipo passa-faixa quando em ressonância com a frequência da onda incidente (WU, 1995; MUNK, 2000). As Figuras 1 e 2 mostram o comportamento descrito acima.

Figura 1 – (a) FSS do tipo metálico, (b) Resposta em frequência.



Fonte: Cavalcanti Filho, 2018.

Figura 2 – (a) FSS do tipo abertura, (b) Resposta em frequência.



Fonte: Cavalcanti Filho, 2018.

As estruturas FSS podem ser classificadas com relação a espessura dos elementos que as compõem, podendo ser de anteparo-fino ou anteparo-espesso. Elementos com espessura menor do que $0,001\lambda$ – λ é o comprimento de onda para a frequência de ressonância do anteparo – são classificados como de anteparo-fino apresentando pequeno volume, peso leve e baixo custo de fabricação (tecnologia de circuito impresso). Acima desse valor são consideradas de anteparo-espesso apresentando grande volume, peso e custos elevados de fabricação sendo aplicados em guias de ondas empilhados (CAMPOS, 2008).

De uma maneira geral, a resposta em frequência de uma FSS depende de uma série de fatores associados aos tipos de elementos, as formas/geometrias, dimensões e outras características, dentre elas: espessura e material utilizado como dielétrico (valor de permissividade elétrica), espessura e material utilizado como condutor (valor da condutividade elétrica), periodicidade entre os elementos, polarização, ângulo de incidência, presença de dispositivos ativos (diodos e varistores, por exemplo), etc. (ANWAR; MAO; NING, 2018).

2.1.3 Forma dos elementos

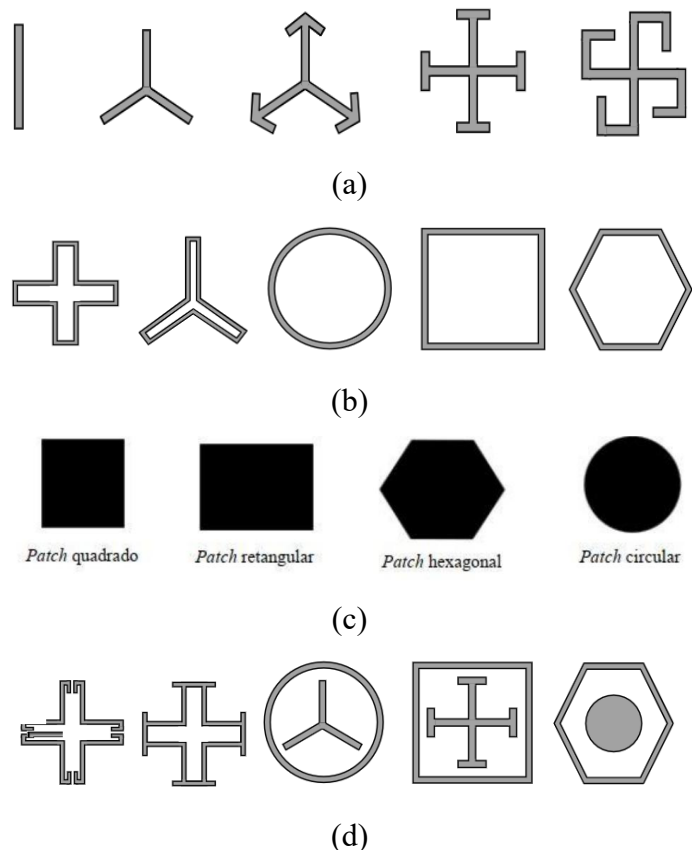
A forma dos elementos (geometria) que constituem uma FSS é uma importante característica de projeto que se relaciona na maneira pelo qual a corrente elétrica se distribui pelos elementos, pois influencia diretamente na forma como os campos elétricos e magnéticos se distribuem, onde a resposta em frequência desses elementos quando da incidência de uma onda eletromagnética é uma característica associada à sua geometria (JAYAKRISHNAN; LIYA, 2020).

Está presente na literatura atual uma vasta diversificação de formas de estruturas FSS que apresentam resposta em frequência de variadas características, a depender da aplicação desejada em específico, bem como a partir da combinação de elementos. A classificação dos grupos básicos foi realizada por Munk (2000), dividindo os elementos em quatro grupos:

- Grupo 1: elementos conectados pelo centro ou N-polos. Exemplos: dipolo fino, dipolo cruzado, tripolo, âncora, cruz de Jerusalém, dentre outros;
- Grupo 2: elementos de *loops* (espiras). Exemplos: espira quadrada simples e concêntrica, anel circular simples e concêntrico, elementos carregados, dentre outros;
- Grupo 3: elementos com interior sólidos. Exemplos: *patches* quadrados, retangulares, triangulares, circulares, dentre outros;
- Grupo 4: elementos combinados e fractais. Exemplos: espira quadrada com cruz de Jerusalém, espira circular com tripolo, dentre outros;

A Figura 3 apresenta alguns exemplos de formas das FSS dos grupos mencionados.

Figura 3 – Exemplos de formas comuns de elementos FSS: (a) Grupo 1, (b) Grupo 2, (c) Grupo 3, (d) Grupo 4.



Fonte: Adaptado de Vardaxoglou, 1997; Moura, 2015.

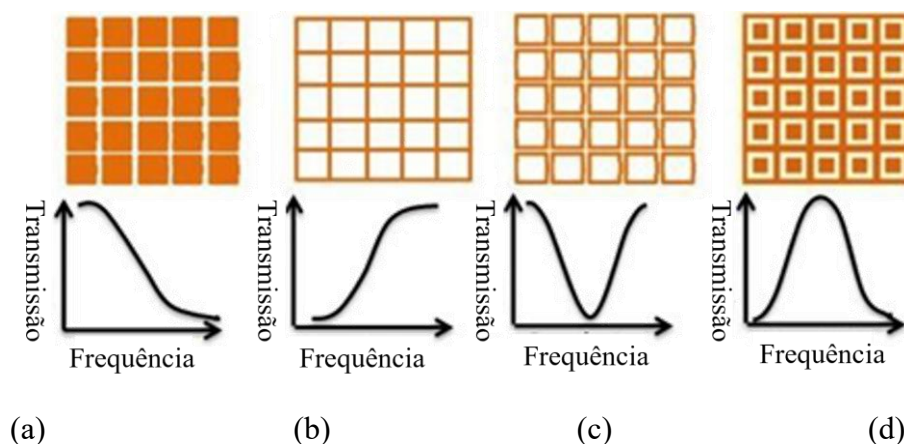
O grupo 4 representa um grupo com infinitas possibilidades, pois o arranjo combinado de elementos e o uso de geometrias fractais podem ser adotados em combinações diversas a depender da aplicação pretendida. Geometrias fractais têm sido estudadas na literatura com o objetivo de obter estruturas FSS compactas, visando reduzir o tamanho da estrutura, com comportamento multibanda e redução de lóbulos laterais (ANWAR; MAO; NING, 2018).

2.1.4 Tipos dos elementos

As FSS podem ser do tipo metálico condutor (*patch*) ou de abertura (*slot*). É possível obter características de filtragem distintas da onda eletromagnética incidente sobre a FSS em função do tipo dos elementos existentes. As FSS do tipo condutor são denominadas capacitivas e apresentam características de filtro rejeita-faixa ou passa-baixa, onde ocorre uma reflexão da onda incidente na superfície dos elementos metálicos do arranjo periódico à medida que estes se aproximam da ressonância. Já as FSS do tipo abertura são denominadas indutivas e apresentam características de filtro passa-faixa ou passa-alta, ocorrendo a transmissão da onda incidente na superfície dos elementos (LIMA, 2021).

As FSS apresentam um comportamento onde o padrão de difração se mantém o mesmo tanto quando a luz incide sobre uma abertura de qualquer forma ou ainda quando esta incide sobre o objeto que é o complemento da abertura. Portanto, filtros com uma certa característica de filtragem podem ser obtidos com base em um filtro com característica oposta (complementar). A Figura 4 mostra a relação entre o tipo do elemento da FSS com sua resposta em frequência utilizando o coeficiente de transmissão (LIU; NIE; TAN, 2016).

Figura 4 – Relação do tipo do elemento da FSS com sua resposta em frequência: (a) FSS filtro passa-baixa, (b) FSS filtro passa-alta (c) FSS filtro rejeita-faixa (d) FSS filtro passa-faixa.



Fonte: Adaptado de Qasem, 2012.

2.1.5 Métodos de análise

Em virtude da evolução dos estudos sobre as FSS ao longo do tempo, na literatura foram surgindo uma série de técnicas/métodos numéricos para se analisar as características de transmissão e reflexão da onda eletromagnética incidente na FSS. Esses métodos são divididos em: métodos aproximados e métodos de onda completa. Os métodos aproximados fazem uso de formulações matemáticas relativamente simples que produzem bons resultados e diminuem o custo computacional para certas estruturas. Para estruturas mais complexas presentes em outras aplicações tais métodos podem gerar resultados imprecisos por limitações matemáticas (LEE; ZARRILHO; LAW, 1982; ZARRILHO; AGUIAR, 1987; DUARTE, 2023).

Uma das técnicas pioneiras do método de onda completa foi a Técnica de Casamento Modal capaz de realizar uma análise detalhada da resposta em frequência, da polarização e do conhecimento da física associada à sua operação. Do método supracitado surgiu o método do Modelo de Circuito Equivalente (método aproximado), sendo um método simplificado que produz bons resultados viabilizando avaliações preliminares do comportamento da resposta em frequência das estruturas FSS. Esta técnica lança mão de uma aproximação quase-estática para calcular as componentes do circuito podendo ser utilizado com baixo custo computacional e elevada velocidade (LEE; LANGLEY, 1985; NÓBREGA, 2013).

A evolução tecnológica no campo da computação permitiu a utilização de métodos mais robustos, substituindo resultados empíricos por formulações matemáticas mais rigorosas, demandando um custo computacional e analítico elevado, no entanto, capaz de entregar resultados mais precisos incluindo o espectro de frequência mais elevado (NÓBREGA, 2013). Os métodos mais comumente utilizados são:

- Método dos Momentos (MoM, do inglês *Method of Moments*);
- Método dos Elementos Finitos (FEM, do inglês *Finite-Element Method*);
- Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD, do inglês *Finite-Difference Time Domain*);
- Método das Ondas (WCIP, do inglês *Wave Concept Interactive Procedure*).

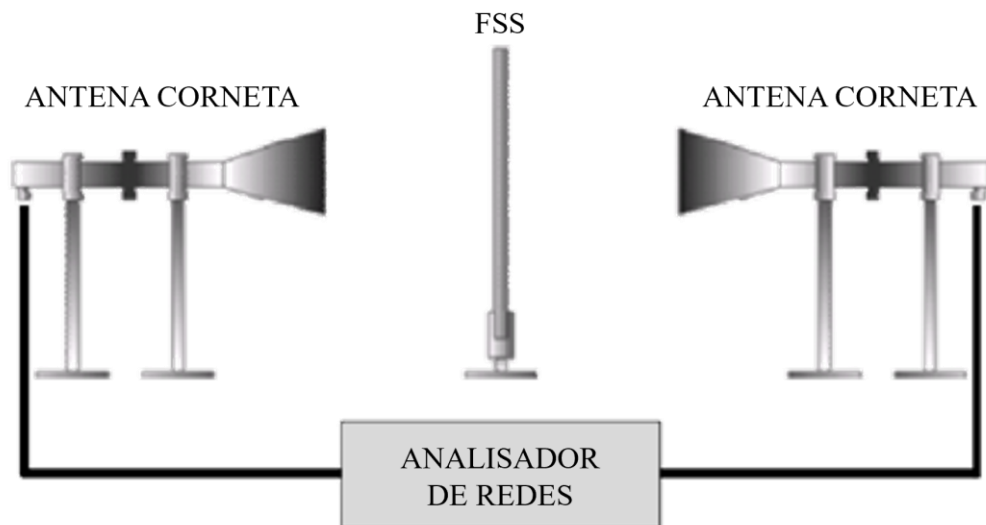
Na análise da resposta em frequência das estruturas FSS são utilizados uma série de *softwares* comerciais capazes de implementar os métodos de análises supramencionados com

elevado grau de confiança nos resultados através de ambientes de simulações interativos. Destacam-se como programas computacionais mais utilizados: *Ansoft Designer*TM, *Ansoft HFSS*TM, *CST*, dentre outros (NÓBREGA, 2013; DUARTE, 2023). O *Ansoft HFSS*TM utilizado nesse trabalho faz uso do Método dos Elementos Finitos.

2.1.6 Técnicas de medição

Existem na literatura uma série de técnicas/métodos de laboratório para se realizar a medição das propriedades de transmissão e reflexão das FSS. Uma das técnicas de medição mais utilizadas faz uso de cornetas direcionais de ganho padrão para funcionarem como antenas transmissoras e receptoras e um analisador de redes vetoriais para funcionar como medidor. É possível medir as características de transmissão da FSS localizada entre as duas antenas nos modos TE e TM mudando a polarização das antenas de vertical para horizontal, respectivamente. As características de reflexão causadas pela FSS deveriam ser possíveis de serem medidas pela configuração descrita anteriormente, no entanto, devido a forte difração causada pelas bordas da superfície da FSS sob medição, dados incorretos serão obtidos (WU, 1995). Absorvedores colocados na estrutura FSS podem atenuar esse efeito (CAMPOS, 2008). A Figura 5 mostra essa técnica de medição.

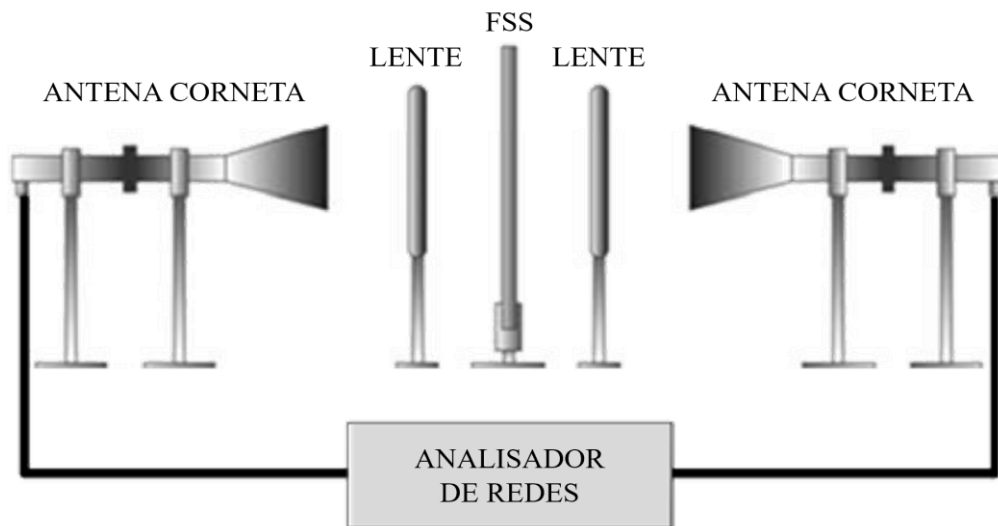
Figura 5 – Sistema de medições em uma FSS.



Fonte: Ferreira, 2014.

Uma outra técnica de medição descrita na literatura consiste no uso de um medidor e de antenas cornetas de ganho padrão associadas a lentes que transformam a onda esférica que sai das antenas cornetas em um feixe de ondas planas paralelas. Esse sistema melhora os níveis de precisão da medição e os coeficientes de transmissão e de reflexão podem ser medidos nas polarizações TE e TM, bem como a execução de testes de estabilidade angular para vários ângulos de incidência das ondas (WU, 1995). A Figura 6 mostra essa técnica.

Figura 6 – Sistema de medições com uso de lentes em uma FSS.



Fonte: Ferreira, 2014.

2.1.7 Principais parâmetros observados em estruturas FSS

Abaixo serão apresentados os principais parâmetros observados em estruturas que se comportam como filtros eletromagnéticos, como é o caso das estruturas FSS.

a) Frequência de ressonância

Em virtude de seu arranjo periódico formado por padrões metálicos (*patches*) ou por padrões de abertura (*slots*), uma Superfície Seletiva em Frequência (FSS) vai se comportar como um filtro para ondas eletromagnéticas que se propagam no espaço livre, e quando apresentam resposta máxima devido a coincidência entre as propriedades eletromagnéticas e dimensões físicas com o comprimento de onda incidente, diz-se que a estrutura entrou em ressonância. A frequência onde isso ocorre é chamada de frequência de ressonância. (WU, 1995; MUNK, 2000).

b) Parâmetros de espalhamento (matriz S)

Os parâmetros de espalhamento (matriz S, do inglês *Scattering*) descrevem como as ondas incidentes e refletidas se comportam em cada porta de uma rede com N portas, permitindo quantificar a propagação do sinal nesse sistema multiportas. Esses coeficientes são organizados em uma matriz de espalhamento, chamada de matriz S, que possui N^2 elementos e representa todas as interações entre as portas do sistema. Considerando sinais de tensão, é possível representar a matriz S da seguinte maneira (POZAR, 2012):

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix}$$

Ou então,

$$[V^-] = [S][V^+]$$

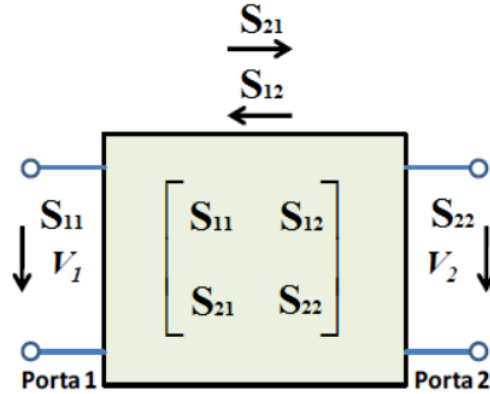
Mais especificamente, cada elemento da matriz é dado por:

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \text{ para } k \neq j}$$

Em que S_{ij} é a relação entre a tensão da onda refletida na porta “i” quando as ondas incidentes nas portas são iguais a zero, exceto na porta “j”. Isso significa que todas as portas $k \neq j$ são casadas para evitar reflexões. Diante disso, S_{ii} fornece o coeficiente de reflexão na porta “i”, e S_{ij} o coeficiente de transmissão da porta “j” para a porta “i”.

Quando as portas do sistema sob análise estão devidamente casadas, garantindo assim que não haja interferências nos resultados, os parâmetros podem então ser determinados por técnicas de análise de circuitos. A Figura 7 mostra uma rede de duas portas, (porta de entrada 1 e porta de saída 2), onde os parâmetros da matriz S_{11} e S_{22} representam os coeficientes de reflexão, enquanto os parâmetros S_{12} e S_{21} representam os coeficientes de transmissão (POZAR, 2012).

Figura 7 – Representação de uma rede de duas portas usando parâmetros de espalhamento.



Fonte: Silva Filho, 2018.

Os parâmetros S são, em geral, números complexos, sendo então conveniente a sua representação em termos dos valores de amplitude e fase. Genericamente, temos (POZAR, 2012):

$$S_{ij} = |S_{ij}|e^{j\phi_{ij}}, \text{ para } i, j = 1, 2$$

Para o caso de considerar a amplitude dada em decibéis (dB), usamos então:

$$|S_{ij}|_{dB} = 20 \log |S_{ij}|$$

c) Largura de banda (BW)

O intervalo de frequência no qual o desempenho de uma estrutura eletromagnética está em conformidade com um padrão pré-determinado é chamado de largura de banda (BW, do inglês *Bandwidth*). Também pode ser referida como uma faixa de valores de frequência onde às características do dispositivo em questão estão dentro de um valor desejável da frequência de ressonância (BALANIS, 2005).

A largura de banda (BW) pode ser expressa como a relação entre a frequência superior e a frequência inferior no intervalo em que a largura de banda está definida, sendo representada pela seguinte expressão:

$$BW = f_{SUP} - f_{INF}$$

Uma outra característica associada a largura de banda é quando relacionada aos parâmetros do substrato do dispositivo eletromagnético, tais como espessura e constante dielétrica. Segundo POZAR (2012) a largura de banda varia aumentando monotonamente com a espessura ou então com a diminuição no valor da permissividade efetiva do substrato.

d) Densidade de corrente elétrica

A lei de Ampère devidamente corrigida com o acréscimo da corrente de deslocamento é demonstrada a seguir, exposta em sua forma diferencial e no domínio da frequência.

$$\nabla \times \vec{H} = -j\omega \vec{D} + \vec{J}$$

Onde, $\vec{H}$ é o vetor campo magnético, $\vec{D}$ é a densidade de fluxo elétrico e $\vec{J}$ é a densidade de corrente elétrica.

Em virtude da característica capacitiva de um dispositivo eletromagnético, pode-se assumir que a maior parcela da corrente elétrica que transpassa a dispositivo é a corrente de deslocamento (MILLIGAN, 2005). A expressão a seguir expressa a densidade de corrente de deslocamento.

$$\vec{J}_d = -j\omega \vec{D}$$

A densidade de fluxo elétrico que atravessa o dielétrico é expressa por:

$$\vec{D} = (\epsilon' - j\epsilon'') \vec{E}$$

Onde $\vec{E}$ é o vetor campo elétrico.

Existe também a presença de corrente de condução que flui principalmente nas extremidades das superfícies condutoras e o surgimento dessa corrente está relacionado ao comprimento físico do dispositivo em questão (SADIKU, 2014). Essa corrente é definida em função do vetor densidade de corrente $\vec{J}$, onde depende da condutividade do meio σ e campo elétrico que transpassa o meio $\vec{E}$, segundo a equação a seguir:

$$\mathbf{J}_c = \vec{\mathbf{J}} = \sigma \vec{\mathbf{E}}$$

Finalmente a lei de Ampère pode ser rescrita conforme a seguir:

$$\nabla \times \vec{\mathbf{H}} = j\omega\epsilon' \vec{\mathbf{E}} + (\omega\epsilon'' + \sigma) \vec{\mathbf{E}}$$

Dessa maneira é possível se obter a relação de tangente de perdas $\tan\delta$ da onda eletromagnética que atravessa a região e será irradiada na sequência, conforme equação a seguir:

$$\tan\delta = \frac{\omega\epsilon'' + \sigma}{\omega\epsilon'}$$

Ou então desconsiderando a condutividade em virtude de seu baixo valor:

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

De acordo com MILLIGAN (2005), o nível associado a densidade da corrente de condução está associado ao bom desempenho do dispositivo eletromagnético, pois esta corrente causa deformações nos campos e gera aquecimento, modificando o desempenho dos parâmetros do referido dispositivo.

2.1.8 Aplicações

Uma FSS é uma estrutura planar com características interessantes para aplicações de engenharia, tais como: peso e volume reduzidos, baixo custo e perfil, possibilidade de integração a outros sistemas de micro-ondas, etc.; com utilidade em diferentes bandas de frequência de RF, micro-ondas, ondas milimétricas e submilimétricas, bem como regiões na ordem de terahertz. São comumente utilizadas em antenas direcionais, detecção e sensibilidade de polarização, comunicações sem fio, identificações de radiofrequência, blindagem eletromagnética, absorvedores, radomes furtivos, aeronaves, supressão de sinais espúrios, aplicações civis e militares, dentre outras (ANWAR; MAO; NING, 2018).

Uma das aplicações mais comumente utilizadas no cotidiano da vida moderna é o anteparo da porta do forno de micro-ondas, caracterizado por um arranjo periódico de aberturas metálicas que apresenta características de filtragem atuando na reflexão da energia na faixa de frequência de micro-ondas ($\sim 2,45$ GHz) e transmitindo na faixa da luz visível (WU, 1995; VARDAXOGLU, 1997; MUNK, 2000). A Figura 8 mostra o anteparo utilizado na porta de um forno de micro-ondas comum.

Figura 8 – FSS utilizada na porta de um forno de micro-ondas comum.

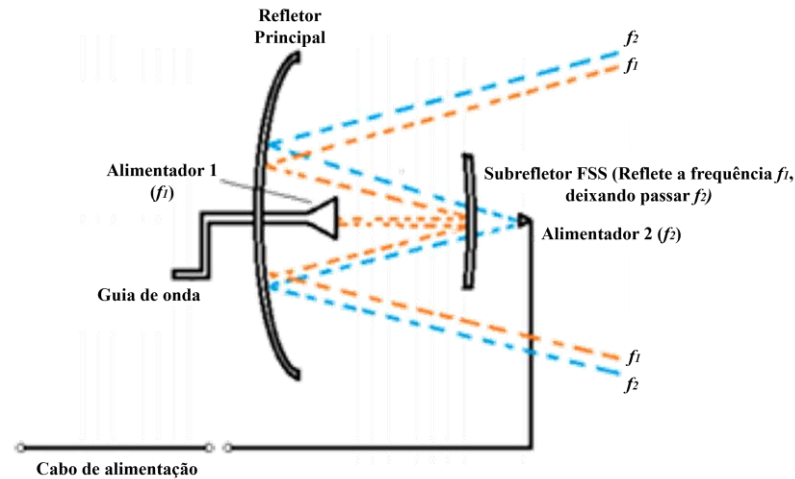


Fonte: Alencar, 2020.

Absorvedores de micro-ondas estão sendo utilizados em aplicações civis e militares que envolvem tecnologia furtiva. Com capacidade de modificar as propriedades de reflexão através da absorção da radiação eletromagnética é possível dificultar a detecção por radares de veículos, aeronaves, planadores, embarcações, mísseis, etc., que possuam suas superfícies internas e externas revestidas com esse tipo de tecnologia. Tal aplicação exige absorvedores de banda larga, capacidade multibanda e elevada eficiência de absorção (COSTA; MONORCHIO; MANARA, 2010; KUMAR; REDDY; J.P., 2022).

As propriedades de filtragem das estruturas FSS são utilizadas na melhoria da eficiência de antenas refletoras. A Figura 9 mostra a aplicação de uma FSS em uma antena refletora de banda dupla, onde o alimentador 1 é colocado no ponto focal do sub-refletor (constituído por uma FSS) e o alimentador 2 é colocado no ponto focal do refletor principal. A estrutura FSS é projetada para ser transparente para a faixa de frequência do alimentador 2, no entanto, deve refletir na banda de frequência do alimentador 1, melhorando assim a eficiência desse sistema (CAMPOS, 2008).

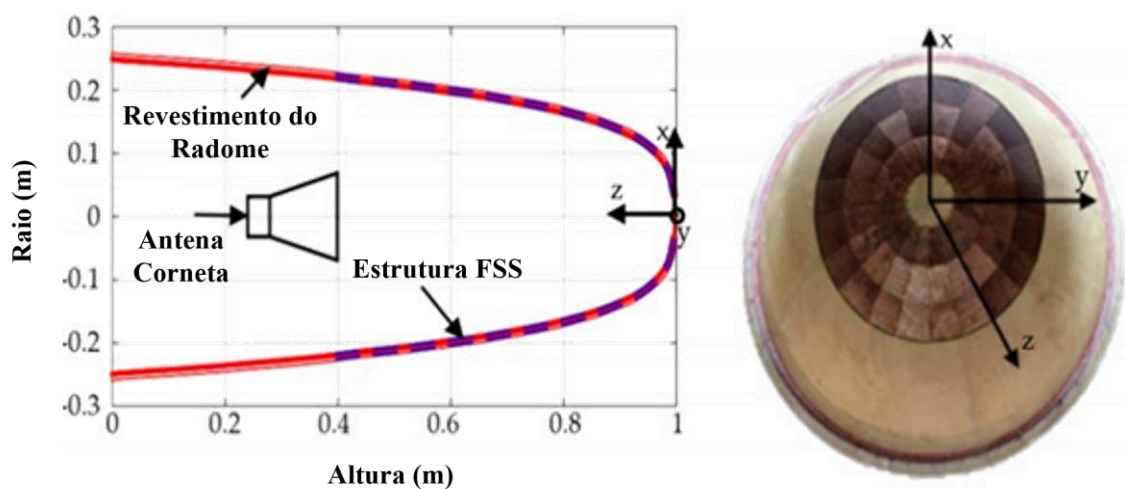
Figura 9 – FSS utilizada em antena refletora.



Fonte: Adaptado de Sousa, 2019.

O radome é outra aplicação em que as FSS podem ser utilizadas na faixa de micro-ondas. Um arranjo periódico de elementos de abertura é ajustado para apresentar comportamento de filtro passa-faixa na frequência de operação da antena, fazendo com que o sinal passe através desta com um mínimo de perda de inserção. Para outras frequências fora da faixa de trabalho da antena, a FSS poderá apresentar características de reflexão. Podem ser utilizados para proteger o sistema de antenas de agentes atmosféricos como chuva, neve, ventos, etc. A Figura 10 um radome utilizando FSS.

Figura 10 – Radome utilizando uma FSS.



Fonte: Adaptado de Duan; Abomakhleb; Lu, 2019.

Nos sistemas de comunicações sem fio (*wireless*) *indoor*, as superfícies seletivas de frequência podem ser utilizadas em construções inteligentes com objetivo de aproveitar melhor a propagação das ondas eletromagnéticas, sendo responsáveis pela diminuição de interferências e colisões de sinais, além de tornar as redes sem fio mais seguras. A blindagem contra sinais externos e confinamento do sinal desejado no interior de ambientes também podem ser aplicações modernas envolvendo as estruturas FSS (DEWANI et al, 2018; DUARTE, 2023).

2.1.9 Estudo do estado da arte atual

O desenvolvimento de estudos e pesquisas no campo do eletromagnetismo aplicado é intenso e constante, não sendo diferente, portanto, quando se trata de estruturas planares com características de filtragem que caracterizam as Superfícies Seletivas em Frequência (FSS). Nesta seção será descrito o estado da arte atual das pesquisas envolvendo as FSS e suas aplicações na ciência e tecnologia. Serão apresentadas algumas pesquisas relevantes publicadas nos periódicos dos últimos cinco anos (2019 a 2024).

Heinrichs e Kronberger (2020) apresentaram o projeto de uma FSS digitalmente sintonizável para utilização em sistemas de Segurança de Camada Física (PLS, do inglês Physical Layer Security) otimizada através de simulações para a faixa de frequência 5 GHz (*Wi-Fi* interno). Após o desenvolvimento da célula unitária, os pesquisadores montaram um protótipo com 64 elementos binários comutáveis (através de diodos PIN ref. SMP1320-077LF) e demonstraram os resultados através de medições em laboratório. Com o protótipo proposto percebeu-se que foi alcançada uma diferença de fase efetiva de pelo menos 115° entre todas as configurações em estado “LIGADO” e todas as configurações em estado “DESLIGADO” dentro da faixa de frequência de *Wi-Fi* interno de 5 GHz, apresentando perdas medidas inferiores a 2,4 dB. A ideia para o futuro desse projeto é avaliar até que ponto os sistemas PLS podem se beneficiar da FSS com capacidade de sintonia digital. Outra ideia seria o desenvolvimento de FSS mais econômicas.

Um dos desafios atuais para as FSS é garantir que as mesmas operem com capacidade multibanda, sejam adaptáveis a superfícies curvas, baixo custo e de relativa facilidade de fabricação. Wei et al (2020) propuseram uma FSS de banda dupla miniaturizada com base em uma placa de circuito impresso de camada metálica única, com capacidade de atender aos requisitos de projeto de substrato fino para aplicação em superfície curva e fornecer

estabilidade na frequência de ressonância. Demonstraram dois projetos práticos de banda dupla para redes WLAN através de método simplificado e flexível. Um dos protótipos chamado de compacto apresentou um tamanho de elemento de apenas 5,2% do comprimento de onda do espaço livre na primeira frequência de ressonância sendo um marco na literatura como sendo a menor FSS WLAN de banda dupla e de camada única já publicado. O outro projeto chamado de substrato fino apresentou frequência estável em diferentes curvaturas testadas apresentando um baixo nível de mudança da frequência de apenas 2,2%. Os protótipos apresentaram uma série de vantagens como: baixo custo de fabricação, miniaturização, aplicação de substrato fino e controle independente das bandas de rejeição com aplicabilidade em superfícies curvas.

A problemática envolvendo o conceito de interferência eletromagnética se deu devido ao aumento das faixas de frequência operacionais dos dispositivos móveis e sistemas *wireless*, o que fez com que se tornasse cada vez mais necessário a proteção de equipamentos sensíveis através da blindagem eletromagnética. Paik et al (2022) apresentaram uma blindagem eletromagnética baseada em FSS com utilização nas faixas de frequência das tecnologias de comunicação 4G e 5G, em virtude de suas qualidades de seletividade de frequência, elevada estabilidade angular e tamanho reduzido. O projeto fez uso de geometrias simples compostas por duas espiras quadradas externas e um dipolo inserido dentro da espira e fazendo uso da técnica fractal e utilizando substrato de FR4 epóxi padrão. Os resultados simulados mostraram uma FSS com duas bandas de operação, em 2,35 GHz e 3,5 GHz cobrindo as bandas das tecnologias 4G e 5G, respectivamente. Foi demonstrado a eficiência de blindagem EM de aproximadamente 32 dB na primeira banda e 33 dB na segunda banda, além de estabilidade angular até 45° nos modos de polarização TE e TM.

As comunicações na faixa do 5G têm atraído o interesse dos pesquisadores sobretudo quando relacionado ao desacoplamento de antenas em sistemas MIMO 5G (do inglês *Multiple Input, Multiple Output*), que se trata de uma tecnologia que utiliza várias antenas pequenas para melhorar o sinal de banda larga aumentando as taxas de transmissão e diminuindo a latência, sendo necessário uma alta eficiência no isolamento entre as antenas e a manutenção das características de radiação e compactação do conjunto. Sobre esse assunto, Merzaki et al (2020) propuseram uma FSS compacta utilizando tecnologia de materiais compósitos que se aproveita do padrão do arranjo que reduz a frequência de trabalho com a periodicidade espacial. Os pesquisadores conseguiram aumentar os valores de capacitância e indutância mútua dos elementos do arranjo minimizando a periodicidade e deslocando a frequência para

a faixa de interesse (5G). Medições experimentais da seção transversal de radar com incidência normal demonstraram um bom desempenho da FSS proposta.

Uma das grandes aplicações fazendo-se uso das estruturas FSS é a redução da seção transversal de radar (RCS) campo diretamente ligado a tecnologia de furtividade utilizada em projetos civis e, principalmente, militares. O tema é pesquisado na literatura a mais de 5 décadas e continua atraindo pesquisadores, como é evidenciado em um trabalho recente publicado por Ravi et al (2023). Neste trabalho é realizado um estudo que descreve as atuais técnicas de redução de RCS passivas para uma grande diversidade de aplicações incluindo FSS, bandas proibidas EBG, ressonadores de anéis divididos e complementares. Um estudo paramétrico e comparativo é realizado obtendo-se uma base de dados robusta representados em gráficos associando tamanho da antena, redução da RCS, ganho, faixa de operação, bem como possíveis pesquisas futuras que poderão ser desenvolvidas.

Algumas poucas pesquisas atuais na literatura envolvendo as Superfícies Seletivas em Frequência foram demonstradas nessa seção com o intuito de evidenciar os atuais caminhos que a pesquisa tem tomado nessa temática, no entanto, é possível verificar uma extensa variedade de aplicações das FSS em diversas áreas da engenharia e eletromagnetismo aplicado.

2.2 Estruturas eletromagnéticas de bandas proibidas

Nesta sessão serão abordados aspectos históricos, conceitos e as características principais relacionados às Estruturas Eletromagnéticas de Bandas Proibidas (EBG).

2.2.1 Aspectos históricos e conceitos introdutórios

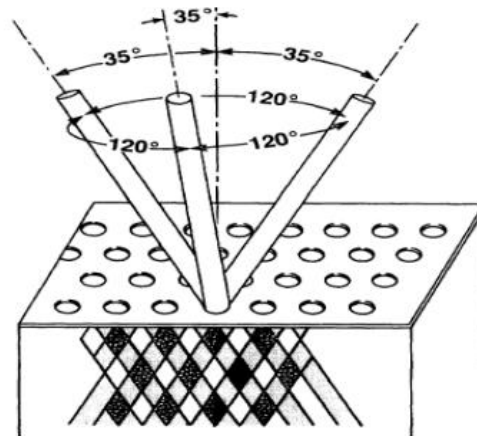
Estruturas Eletromagnéticas de Bandas Proibidas (EBG) são arranjos periódicos que apresentam comportamento seletivo em certas faixas de frequência e direção de propagação das ondas eletromagnéticas incidentes através da proibição desta propagação. Surgiram inicialmente com a nomenclatura de Estruturas Fotônicas de Bandas Proibidas (PBG, do inglês *Photonic Band Gap*), pois seus primeiros estudos foram realizados na região óptica do espectro eletromagnético de frequência (CARDOSO, 2012).

A tecnologia PBG, que surgiu de uma publicação de 1987 do pesquisador Yablonovitch (1987), introduziu o conceito de bandas proibidas fotônicas para controlar a

emissão espontânea da luz. Tal conceito se baseia na utilização de cristais fotônicos para impedir a propagação de fótons em uma determinada faixa (ou banda) de energia específica, chamada de banda proibida (do inglês *Band Gap*). A reflexão em materiais comuns se dá devido à absorção e re-emissão de fótons de energia ao contrário do que acontece em estruturas PBG, que ocorre devido à falta de modos de propagação ao longo do eixo cristalino. Tal conceito é essencial para entender e diferenciar as estruturas PBG.

Dando continuidade à sua pesquisa, Yablonovitch (1991) comprovou experimentalmente a viabilidade de criar um material tridimensional com uma banda proibida (PBG), onde a constante dielétrica varia periodicamente nos três eixos de propagação. Essa estrutura foi concebida através de múltiplas perfurações em um substrato, formando uma rede periódica triangular de orifícios onde cada orifício é perfurado três vezes com um ângulo de separação de 120° e uma inclinação de 35° em relação ao eixo vertical, resultando em alternância das constantes dielétricas do material e do ar nos três eixos de propagação da onda eletromagnética. Foi observado então, de maneira pioneira, na faixa de frequência de micro-ondas, o surgimento de bandas proibidas. A Figura 11 mostra a metodologia supracitada.

Figura 11 – Estrutura PBG tridimensional adotada na metodologia de Yablonovitch (1991).



Fonte: Yablonovitch, 1991.

Após os trabalhos de Yablonovitch, o tema das bandas proibidas foi bastante estudado em diversas outras pesquisas com o intuito de se observar e analisar o efeito dessas bandas em meios de propagação periódicos, o que acarretou em um desenvolvimento considerável acerca das estruturas PBG e do eletromagnetismo aplicado a este conceito. Uma das aplicações dentro do campo óptico que surgiram com base em estruturas PBG foi a fibra óptica microestrutura (PCF, do inglês *Photonic Crystal Fiber*). Neste tipo de fibra óptica a

propagação guiada da luz se baseia no confinamento da mesma no núcleo desta fibra em virtude da proibição da propagação da onda eletromagnética através da rede periódica presente no dielétrico da fibra, diferentemente da fibra óptica convencional que se baseia na reflexão interna total da luz no interior da fibra devido à diferença entre as constantes dielétricas presentes (JOANNOPOULOS, 2007).

Outras aplicações no campo óptico das estruturas PBG são os sensores baseados em fibras FBG (do inglês *Fiber Bragg Gratings*). Tais fibras são produzidas com um núcleo que possui uma variação (alternância) periódica da constante dielétrica do meio, resultado da exposição do mesmo a uma radiação durante o processo de fabricação. Esse tipo de arranjo faz com que a fibra atue com características de filtragem para certas faixas das ondas eletromagnéticas, causando reflexão ao longo da fibra. São utilizadas principalmente como sensores ópticos que respondem a estímulos mecânicos (pressão ou temperatura), pois as variações nessas variáveis causam alterações na periodicidade da estrutura o que pode ser avaliado/detectado por meio instrumentação adequada (CAZO, 2001; JOANNOPOULOS, 2007).

As estruturas PBG possuem propriedades que podem ser aplicadas a um amplo espectro de frequência e muitas pesquisas têm sido realizadas observando as propriedades das estruturas de bandas proibidas na região do espectro de frequências milimétricas (faixa de micro-ondas) e, nessa região, tais estruturas recebem a nomenclatura de EBG (do inglês *Eletromagnetic Band Gap*), se caracterizando como Estruturas Eletromagnéticas de Bandas Proibidas (ANDRADE, 2013).

Desde então, novas pesquisas e projetos de estruturas EBG têm sido investigadas com o objetivo de melhorar o desempenho das faixas de rejeição das bandas proibidas, estudar o comportamento em frequência sob variadas características, aplicações em dispositivos planares diversos, atenuação de modos de propagação indesejados, filtros, polarizadores, eliminação de ondas de superfície, dentre outras possibilidades (SOBRINHO, 2018).

2.2.2 Características das estruturas

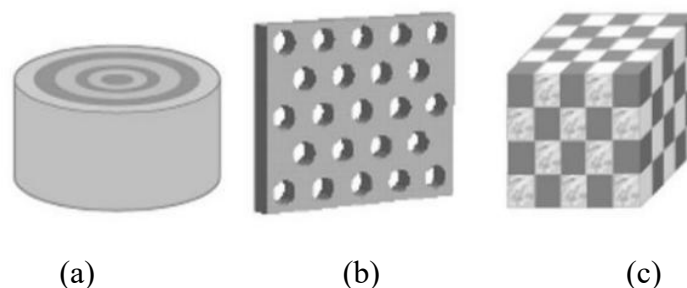
É possível fazer com que uma onda eletromagnética se propague em uma determinada banda de frequência que se deseje e que se faça com que outros modos de propagação indesejáveis sejam evitados através do uso de estruturas EBG, que se caracterizam por serem redes periódicas artificiais que trabalham como bandas de energia discretas em um arranjo de

rede cristalina de átomos e através das dimensões da rede realizar o controle de propagação mencionado. Essa característica das estruturas EBG viabiliza o seu uso em novos projetos de filtros, acopladores, antenas, guias de ondas e demais aplicações em amplas faixas de frequência (SILVA, 2018).

Existe uma forte dependência das propriedades elétricas e magnéticas do material – definidas pela permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ) – com a propagação de uma onda eletromagnética. A propagação da onda se dá em meios convencionais quando ambas as propriedades citadas anteriormente (ϵ e μ) são positivas. Quando uma dessas grandezas adota um valor negativo ocorre o fenômeno de banda proibida (EBG), fazendo com que o material não suporte a propagação de ondas eletromagnéticas (DAVIDSON, 2005).

As estruturas EBG geralmente são classificadas como: unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D); onde essa classificação tem por base suas propriedades ao longo da direção de propagação da onda eletromagnética incidente. Nas estruturas unidimensionais (1D) acontecem bandas proibidas em apenas uma direção particular de propagação. Nas estruturas bidimensionais (2D) ocorrem a reflexão em todas as direções do plano elétrico bidimensional (Plano de campo elétrico E) das ondas eletromagnéticas incidentes. Já nas estruturas tridimensionais (3D) ocorrem o bloqueio total de propagação das ondas eletromagnéticas para qualquer ângulo de incidência quando estas estão na faixa de frequência da banda de rejeição da estrutura (JOHNSON; JOANNOPOULOS, 2003). A Figura 12 mostra as estruturas EBG em 1D, 2D e 3D.

Figura 12 – Classificação das estruturas EBG: (a) 1D, (b) 2D, (c) 3D.



Fonte: Johnson; Joannopoulos, 2003.

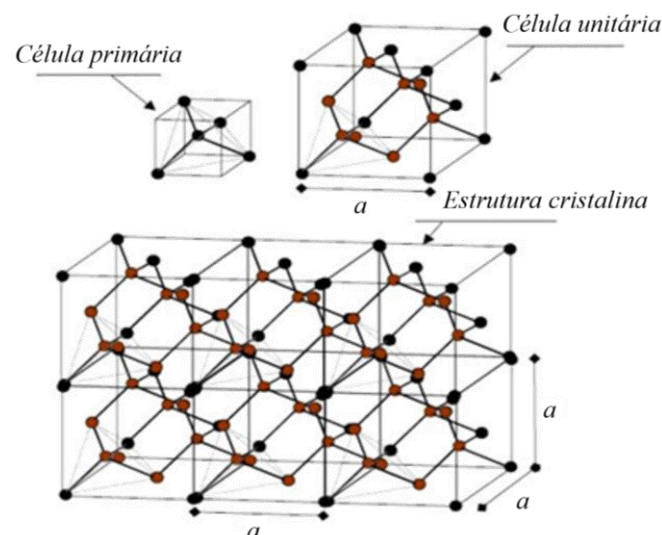
Em termos de aplicabilidade com relação as estruturas supracitadas, como forma exemplificativa, a literatura diz que as estruturas unidimensionais (1D) podem ser utilizadas para se aumentar o ganho das antenas fabricadas em circuito impresso desde que seja inserido um arranjo periódico de várias camadas dielétricas na parte superior do dispositivo planar

(YANG; ALEXOPOULOS, 1987). Com relação as estruturas bidimensionais (2D), estas podem ser utilizadas para inibir o fenômeno da emissão espontânea em lasers e diodos emissores de luz, aumentando a eficiência destes (YANG; ALEXOPOULOS; YABLONOVITCH, 1997). Finalmente com relação as estruturas tridimensionais (3D) estas podem ser usadas em microestruturas ressonantes do tipo Fabry-Perot, refletindo a radiação em todas as direções para dentro de si (DIAS, 2005).

2.2.3 Redes e geometria

Para se considerar uma estrutura como periódica se faz necessário que os elementos que a compõem se encontrem dispostos de maneira regular no espaço, sejam seus átomos, moléculas, células, etc. Balbi (1998) afirma que toda estrutura é caracterizada com um determinado arranjo denominado como célula primária. Ao se deslocar essa célula primária em todas as direções espaciais forma-se então a célula unitária do dispositivo. Ao se realizar o mesmo deslocamento agora com a célula unitária tem-se a estrutura periódica. Finalmente, então, pode-se afirmar que as redes são conjuntas de pontos distanciados igualmente dos mesmos espaçamentos, organizados em determinadas linhas orientadas sob os mesmos ângulos. Cardoso (2012) informa ser possível controlar a propagação das ondas eletromagnéticas em certos modos através das alterações nas características e aspectos dimensionais das redes. A Figura 13 demonstra os conceitos de célula primária, célula unitária e estrutura periódica.

Figura 13 – Conceitos de célula primária, célula unitária e estrutura periódica.

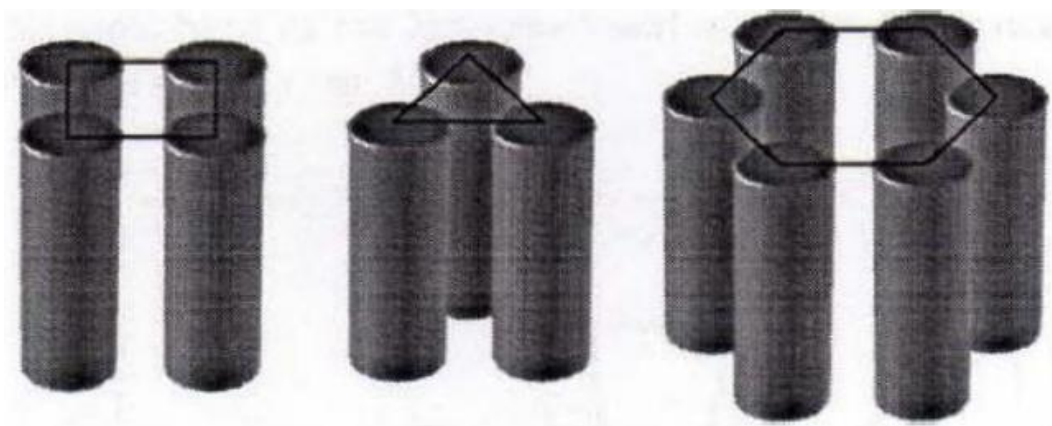


Fonte: Adaptado de Balbi, 1998.

Diversos trabalhos foram publicados no que diz respeito a geometria das estruturas EBG, onde elas se apresentam em mais variados formatos tendo seus furos na forma quadrada, circular, triangular, dentre outros. Na literatura já se sabe que o formato circular apresenta uma característica de maior largura de banda do que a forma quadrada para uma mesma área, bem como o furo cilíndrico apresenta maiores valores no que diz respeito ao ganho e largura de banda do que os demais formatos (AVINASH; RUKMINI, 2011; GUPTA; KUMAR, 2013).

A geometria não diz respeito apenas a forma dos furos, mas também a maneira pelo qual a rede é formada onde esta formação pode apresentar variados formatos geométrico distintos, sendo os mais comuns: quadrado, triangular e hexagonal; mostrados na Figura 14. Dias et al. (2005) apontou que a rede quadrada obteve uma maior largura de banda e frequência de operação do que a rede hexagonal e triangular, assim como apesar da rede triangular apresentar a mesma largura de banda da hexagonal, a primeira apresentou uma frequência de ressonância mais alta.

Figura 14 – Exemplos de geometria das redes EBG: (a) quadrada, (b) triangular, (c) hexagonal.



Fonte: Dias et al., 2005.

O material utilizado no preenchimento dos furos das redes EBG também é investigado na literatura, fazendo-se estudos com os furos sendo preenchidos com ar (permeabilidade aproximadamente igual a 1) ou através de dopagem com metais e materiais dielétricos (ALMEIDA; SOBRINHO, 2004). Sabe-se também que quanto maior o valor da permissividade elétrica do material que compõe o furo ou ainda da maior quantidade de furos (maior arranjo periódico), o comportamento da resposta em frequência das estruturas EBG é melhorado (MUKHERJEE, 2015).

2.2.4 Frequência das estruturas EBG

Segundo RADISIC et al. (1998), é possível determinar a faixa de frequência de operação das estruturas EBG através da condição de Bragg:

$$k = \frac{\pi}{a}$$

Onde “k” é a constante de propagação e “a” é a constante de rede (também chamada de *pitch*). O valor da constante de propagação “k” pode ser aproximado para:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_g}$$

Onde “ λ_g ” é o comprimento de onda correspondente a frequência onde ocorre o bloqueio da propagação da onda eletromagnética. Dessa maneira:

$$a \approx \frac{\lambda_g}{2}$$

Resultando em uma frequência para a faixa proibida:

$$f_c = \frac{c}{2a\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

Onde “c” é o valor da velocidade da luz no vácuo ($\sim 3,0 \times 10^8$ m/s) e “ ϵ_{eff} ” é a constante dielétrica efetiva. Para valores pequenos da relação r/a pode-se considerar “ $\epsilon_{eff} \approx \epsilon_r$ ”.

2.2.5 Fator de preenchimento das estruturas EBG

Segundo RADISIC et al. (1998), o fator de preenchimento (dado por Λ) exprime a relação entre a área dos furos da rede EBG e a área total em uma célula unitária, onde esse fator tem influência direta na faixa de rejeição de propagação da onda eletromagnética. É calculado através da seguinte expressão:

$$\Lambda = \frac{A_{\text{furo}}}{A_{\text{cell uni}}}$$

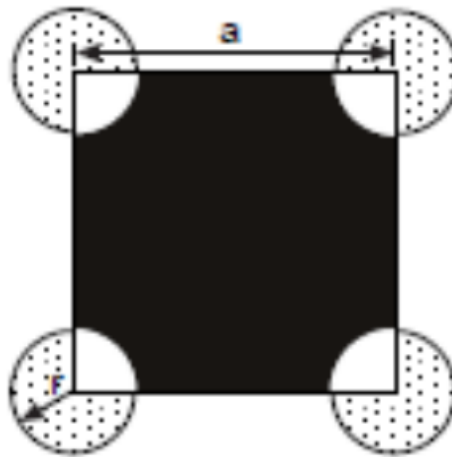
Onde “ A_{furo} ” é a área dos furos e “ $A_{\text{cell uni}}$ ” é a área total de uma célula unitária. É possível calcular o fator de preenchimento em redes retangulares com furos de formatos circulares através da seguinte expressão:

$$\Lambda = \pi \frac{r^2}{a}$$

Sendo “ r ” o raio do furo e “ a ” a constante da rede (*pitch*). De acordo com Maia (2016) O comportamento da estrutura é determinado pela relação r/a , onde a medida que o valor dessa razão diminui mais a resposta da estrutura se aproxima de uma estrutura sem EBG (ver Figura 15). A quantidade de furos é limitada pelo valor da constante da rede (*pitch*), onde esses valores variam de acordo com o projeto e aplicação em questão. O período da rede pode ser calculado por uma relação que seja no mínimo três vezes o valor do raio do furo, a saber:

$$a = 3r$$

Figura 15 – Relação de preenchimento de estruturas EBG.



Fonte: Maia, 2016.

2.3 Tecnologia 5G

O presente tópico irá tratar sobre a evolução das redes móveis e seus conceitos iniciais, abordagem da tecnologia 5G, suas possibilidades e aplicações atuais.

2.3.1 Evolução das gerações de redes móveis

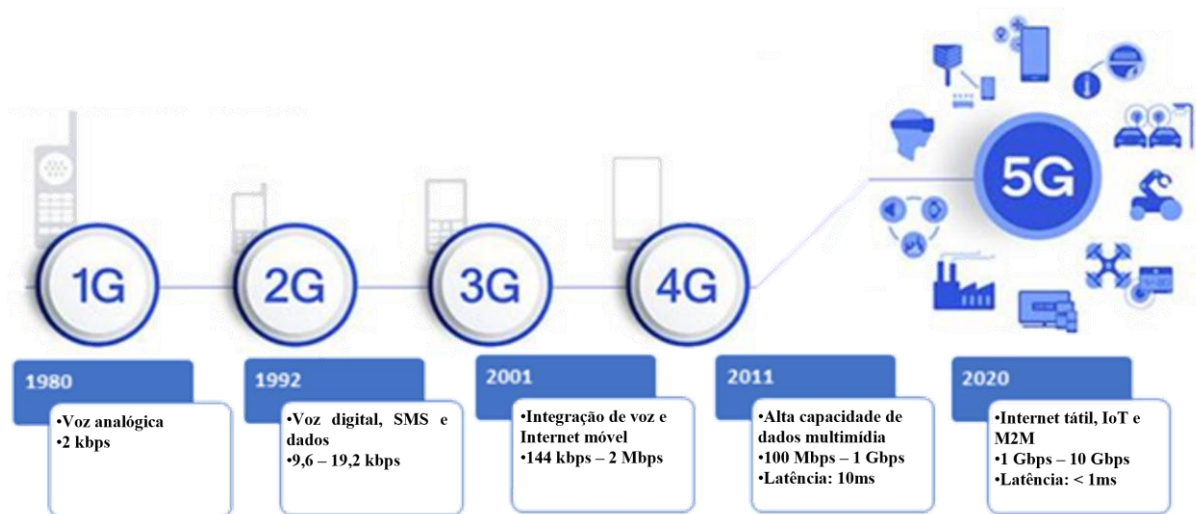
A possibilidade de comunicação através de dispositivos móveis e a consequente evolução das redes é algo que remonta aos anos 1980. A primeira geração de rede móvel (denominada de 1G) possibilitou que os dados de voz fossem transferidos e recebidos simultaneamente (modo duplex) em uma comunicação sem fio por meio de ondas analógicas, no entanto, apresentando uma série de limitações que causavam graves problemas nas comunicações. Alguns anos depois, já na década de 1990, surgem as tecnologias de segunda geração (2G) com o objetivo de superar as limitações das redes 1G, sobretudo na melhoria da qualidade de transmissão e de cobertura do sinal. Nesse momento surge o sinal digital em substituição ao analógico, chamado de GSM (do inglês *Global System for Mobile communications*). A terceira geração (3G) surge já nos anos 2000, com o objetivo de atender a uma ampla diversidade de aplicações multimídia. Nesse momento foi criado o sistema UMTS (do inglês *Universal Mobile Telecommunications System*), que possibilitou que os aparelhos compatíveis com essa tecnologia pudessem acessar a internet com velocidades ditas aceitáveis (PEREIRA, 2022).

A tecnologia de quarta geração (4G) veio com o intuito de melhorar a velocidade de transmissão das redes móveis da geração anterior, surgindo próximo aos anos 2010, chegando em velocidades de 100 Mbps (megabit por segundo). Com essa geração surgiu a tecnologia LTE (do inglês *Long Term Evolution*), sendo possível a divisão de dados móveis entre diferentes aparelhos compatíveis com essa tecnologia, maiores velocidades na rede de dados móveis, desenvolvimento da televisão digital de alta definição, dentre outras possibilidades (PEREIRA, 2022; DANGI et al., 2022).

A evolução de cada geração sempre se pautou na busca pela melhoria no acesso aos serviços de comunicação móveis, sobretudo no quesito de aumento da velocidade de transmissão de dados. No entanto, o desenvolvimento da quinta geração (5G) se deu não apenas pela busca de melhoria da velocidade de transmissão de dados, mas também na capacidade de comunicação em tempo real e a interação intensa entre máquinas, o que efetivamente impulsionam as pesquisas e os meios para desenvolvimento desta nova tecnologia. (AL-NAMARI; MANSOOR; IDRIS, 2017). Dentre as possibilidades da tecnologia da rede 5G, podem se citadas: maior flexibilidade e capacidade na gestão dos dados, cidades e/ou objetos inteligentes, computação em nuvem, carros com capacidades autônomas, avanços na medicina, realidade virtual, IoT (do inglês *Internet of Things*), dentre

outras (CHAVES, 2021). A Figura 16 mostra um esquema demonstrando a evolução das redes móveis de comunicação.

Figura 16 – Evolução das redes móveis de comunicação.



Fonte: Adaptado de Qualcomm (2019).

2.3.2 Características da tecnologia 5G

A tecnologia de quinta geração (5G) representa uma nova era nas redes móveis de comunicação, trazendo consigo uma série de avanços significativos, tais como: melhoria no transporte de uma massiva quantidade de dados em um tempo cada vez menor (velocidade de transmissão), processamento com mínimo de atraso de grandes volumes de informação (latência) e conexão segura simultânea de grande quantidade de dispositivos. Já é consolidado na literatura que a rede 5G vai além de melhoria na velocidade e capacidade de transmissão de dados do 4G, onde esta evolução é crucial para garantir a confiabilidade e a capacidade de suportar a crescente demanda por conectividade em massa (ANDREWS et al., 2014; ALÉN-SAVIKKO, 2019).

A crescente demanda por velocidade na transmissão de dados em redes móveis, impulsionado por aplicações modernas, tais como: realidade aumentada, vídeos em alta definição e internet na palma da mão; têm exigido da indústria e dos centros de pesquisa o desenvolvimento de uma gama de novas tecnologias para suportar serviços emergentes, por exemplo: carros autônomos inteligentes, automação industrial (indústria 4.0), telemedicina, Internet das Coisas (IoT), dentre outras. Isso acaba resultando em projetos das redes 5G que não só visam melhorar os indicadores tradicionais de desempenho, como cobertura e

capacidade, mas também introduzir novas métricas de confiabilidade, densidade de conexão, menor latência, velocidade e eficiência energética. Para a maioria dos provedores de serviços de internet (ISP, do inglês *Internet Service Provider*), a transição para o 5G representa uma oportunidade significativa e potencial de novos negócios e potencial de receita, mas que requer um investimento substancial em toda a cadeia de infraestrutura (SHANKARANARAYANAN; GHOSH, 2017).

Segundo Chaves (2021) existem três requisitos principais para se compreender os desafios enfrentados no desenvolvimento da tecnologia 5G, sendo eles:

- Velocidade de transmissão de dados: a elevada demanda por novos dispositivos que exigem tráfego de dados móveis requer um aumento significativo na velocidade de transmissão desses dados, passando de 10 Mbps para mais de 100 Mbps, podendo chegar até 20 Gbps;
- Latência: capacidade de redução da latência para 4 milissegundos contra os 10 milissegundos atuais, com objetivo de chegar em 1 milissegundo para determinadas aplicações específicas.
- Conectividade: a tecnologia 5G deve ser capaz de atender um número maior com variados dispositivos, com possibilidade de conectar 1 milhão de dispositivos por quilômetro quadrado.

2.3.3 Classificação e cenários de uso da tecnologia 5G

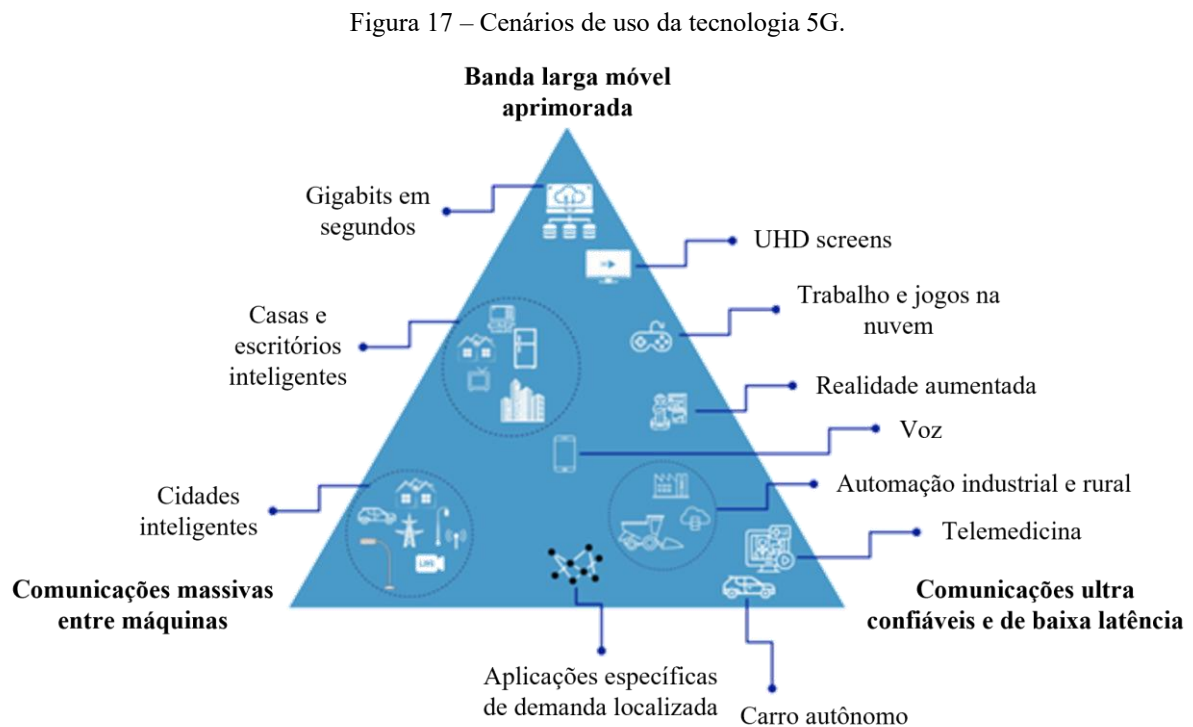
A tecnologia 5G foi categorizada em três cenários de uso, definidas pela União Internacional de Telecomunicações ITU (do inglês *International Telecommunication Union*), agência especializada das Nações Unidas para tecnologias de informação e comunicação, através de seus documentos técnicos classificados como Recomendações. A Recomendação ITU-R M.2083 (2015), mostra a seguinte classificação:

- Banda larga móvel aprimorada eMBB (do inglês *Enhanced Mobile Broadband*): cenário que inclui cobertura de área ampla e hotspot, os quais possuem requisitos

diferentes. As principais aplicações envolvem: conectividade melhorada de banda larga, colaboração entre empresas, realidade virtual aumentada, etc.;

- Comunicações massivas do tipo máquina mMTC (do inglês *Massive machine-type communications*): cenário corresponde a serviços que exigem elevados requisitos de latência, confiabilidade e alta disponibilidade. As principais aplicações envolvem: Internet das Coisas (IoT), casas e cidades inteligentes, rastreamento/monitoramento de ativos em modo remoto, monitoramento de energia, dentre outras;
- Comunicações ultra-confiáveis e de baixa latência URLLC (do inglês *Ultra-reliable and low-latency communications*): cenário que se relaciona a serviços que apresentam um número elevado dispositivos conectados, vastas áreas de cobertura, que usem dispositivos de baixo custo e vida útil de bateria extensa. As principais aplicações envolvem: veículos autônomos, telemedicina, automação industrial moderna e outras.

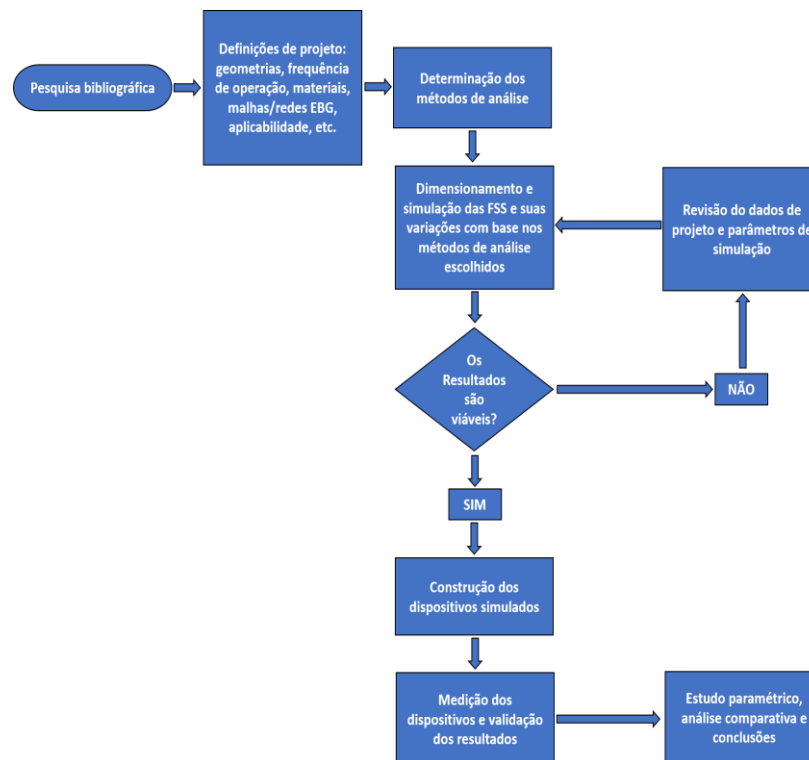
A Figura 17 mostra os cenários de uso da tecnologia de redes móveis 5G.



Fonte: Adaptado de ITU-R M.2083 (2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma abaixo exhibe de forma sucinta todo o processo e roteiro de execução do presente trabalho proposto. É definido todo o procedimento de como será realizada a condução de todas as etapas do trabalho, indo desde a fase de pesquisa bibliográfica até as conclusões obtidas de posse dos resultados simulados e medidos avaliados.



Fonte: Autoria própria, 2025.

3.1 Pesquisa bibliográfica e estado da arte

Primeiramente foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica a respeito das Superfícies Seletivas em Frequência (FSS), mostrando as definições e princípio de funcionamento, a evolução histórica, os tipos dos elementos que compõe a estrutura (condutor e abertura), as diferentes formas/geometrias utilizadas, as técnicas e modelos adotados na análise, projeto e medição dos dispositivos, o comportamento da resposta em frequência das diferentes topologias de filtragem, os parâmetros fundamentais associados a tais estruturas, a aplicabilidade nos sistemas atuais, bem como a teoria eletromagnética associada. Além da pesquisa sobre as Superfícies Seletivas em Frequência, foi realizada uma pesquisa referente as estruturas periódicas de bandas proibidas (EBG), buscando saber o conceito e as

características dessas estruturas, a evolução destas ao longo do tempo, onde acontecem na natureza, os diferentes tipos de estruturas, sua aplicabilidade e limitações associadas, a influência dessas estruturas em dispositivos planares fazendo associação com a teoria eletromagnética. As informações pertinentes à tecnologia 5G também foram pesquisadas, trazendo informações conceituais, do histórico de desenvolvimento, das faixas de aplicação, das padronizações, dos órgãos controladores e demais características associadas a este tipo tecnologia. Em todos os assuntos tratados durante a pesquisa bibliográfica foram evidenciados seus estados da arte atuais.

3.2 Métodos de análise

Para o desenvolvimento do estudo em questão foram previamente projetados e modelados no *software* de simulação *Ansoft HFSS*[®], que utiliza o Método dos Elementos Finitos (FEM, do inglês *Finite Element Method*), três estruturas FSS de elementos condutores atuando como filtros rejeita-faixa de geometria simples que servirão de padrão de referência inicial para toda a análise que se seguirá, a saber: espira quadrada, anel circular e dipolo cruzado; sendo estas estruturas já validadas na comunidade acadêmica utilizando-se o Método do Circuito Equivalente (MCE) descrito na literatura e projetadas para operarem na faixa de frequência de ressonância com aplicabilidade no espectro da tecnologia 5G.

3.3 Dimensionamento, modelagem e simulação

A modelagem das dimensões dos elementos condutores das estruturas FSS propostas foi realizada para uma faixa de frequência de ressonância da tecnologia 5G e otimizada fazendo-se uso de recursos computacionais recursivos a fim de que os dispositivos operem na faixa de frequência adotada. Tais estruturas foram formadas por células unitárias iguais com formato quadrangular de tamanho 22 mm x 22 mm (que corresponde ao tamanho do substrato das estruturas), sendo utilizado um substrato de FR4 (fibra de vidro) com altura de 1,56 mm, permissividade elétrica ϵ de 4,4 e tangente de perdas δ de 0,02. Os elementos metálicos foram modelados com espessura de 0,05 mm e constituídos de material “*Cooper*” (Cobre, em inglês). As simulações através do *software Ansoft HFSS*[®] foram realizadas através do teorema de Floquet, adotando para o intervalo de frequência os limites de 1,0 a 6,0 GHz com 451 pontos.

Para cada projeto das FSS padrão de referência foi proposto a aplicação no substrato de três malhas/redes 3x3, inspiradas em EBG de formato quadrangular, com variação do diâmetro dos furos presentes em tais estruturas sendo eles de: 3mm, 4mm e 5mm. Para cada diâmetro adotado foi realizada uma modificação no posicionamento dos furos ao longo do substrato se diferenciando em três tipo, sendo eles: no meio do substrato (denotado pela letra “M”), no final do substrato (denotado pela letra “F”) e de dupla camada (denotado pela letra “D”). Nessas variações, a altura total do substrato dielétrico foi triplicada em comparação ao projeto das FSS padrão de referência, com o objetivo de se investigar a influência de um substrato mais espesso, bem como da presença da malha/rede inspirada em EBG e da influência do posicionamento dos furos, na resposta em frequência dos dispositivos projetados. Ao total foram 33 (trinta e três) dispositivos projetados, incluindo as estruturas padrão de referência, as estruturas com substrato triplicado e as suas respectivas variações contendo as malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG, sendo 11 (onze) deles relacionados a FSS espira quadrada, 11 (onze) relacionados a FSS anel circular e os outros 11 (onze) finais relacionados a FSS dipolo cruzado. As malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG, portanto, tiveram variações no diâmetro dos furos, no posicionamento desses furos ao longo do substrato, bem como no volume total ocupado por estes furos no substrato dielétrico, a fim de se investigar e fazer um estudo paramétrico comparativo do comportamento da resposta em frequência de todos os dispositivos projetados.

Com as estruturas projetadas, desenhadas e simuladas no *software* comercial *Ansoft HFSS®* considerando as FSS padrão de referência, as diferentes malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG propostas e as respectivas mudanças no posicionamento (e altura) dos furos ao longo do substrato dielétrico, foram obtidos os resultados simulados referentes aos parâmetros de: frequência de ressonância (f_r), coeficiente de transmissão (S_{21}), largura de banda (BW) e densidade superficial de corrente (J) nos elementos condutores, tanto para a polarização TE (polarização vertical) quando para a polarização TM (polarização horizontal). As dimensões das FSS padrão de referência (espira quadrada, anel circular e dipolo cruzado), das malhas/redes inspiradas em EBG e do posicionamento dos furos no substrato dielétrico estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões das estruturas FSS padrão e das variações das redes/malhas inspiradas em EBG.

Estrutura de referência	Dimensões da FSS	Características do substrato (FR4 epóxi)
-------------------------	------------------	--

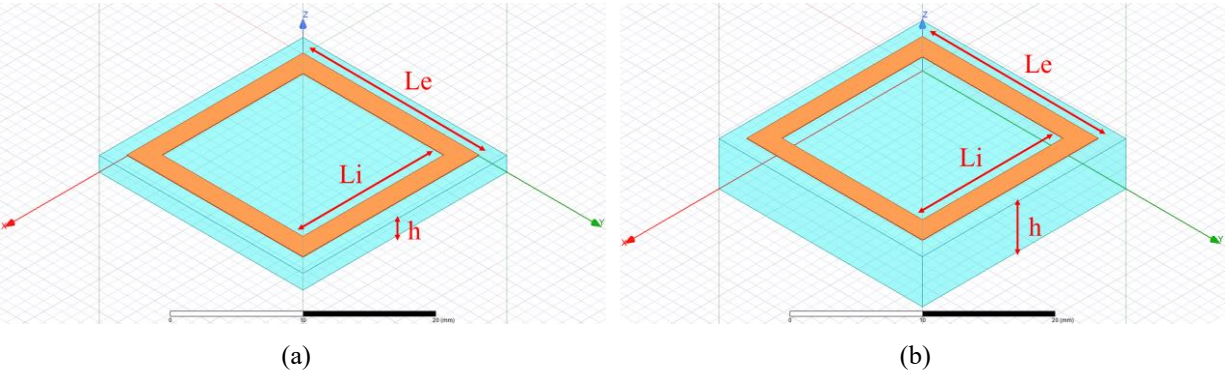
Espira quadrada simples	Tamanho da célula unitária (mm)	Largura externa “Le” (mm)	Largura interna “Li” (mm)	Permissividade elétrica ϵ_R	Tangente de perdas δ	Altura do substrato “h” (mm)
	22 x 22	19	15,2	4,4	0,02	1,56
Espira quadrada com substrato triplicado	Tamanho da célula unitária (mm)	Largura externa “Le” (mm)	Largura interna “Li” (mm)	Permissividade elétrica ϵ_R	Tangente de perdas δ	Altura do substrato “h” (mm)
	22 x 22	19	15,2	4,4	0,02	4,68
Anel circular simples	Tamanho da célula unitária (mm)	Raio externo “Re” (mm)	Raio interno “Ri” (mm)	Permissividade elétrica ϵ_R	Tangente de perdas δ	Altura do substrato “h” (mm)
	22 x 22	10,2	9,2	4,4	0,02	1,56
Anel circular com substrato triplicado	Tamanho da célula unitária (mm)	Raio Externo “Re” (mm)	Raio Interno “Ri” (mm)	Permissividade elétrica ϵ_R	Tangente de perdas δ	Altura do substrato “h” (mm)
	22 x 22	10,2	9,2	4,4	0,02	4,68
Dipolo cruzado simples	Tamanho da célula unitária (mm)	Comprimento da fita “Cf” (mm)	Largura da fita “Lf” (mm)	Permissividade elétrica ϵ_R	Tangente de perdas δ	Altura do substrato “h” (mm)
	22 x 22	20,5	1,7	4,4	0,02	1,56
Dipolo cruzado com substrato triplicado	Tamanho da célula unitária (mm)	Comprimento da fita “Cf” (mm)	Largura da fita “Lf” (mm)	Permissividade elétrica ϵ_R	Tangente de perdas δ	Altura do substrato “h” (mm)
	22 x 22	20,5	1,7	4,4	0,02	4,68

Malha/rede inspirada EBG	Diâmetro do furo “d” (mm)	Constante da rede “a” (mm)	Relação r/a (aprox.)	Altura dos furos na posição central (M)	Altura dos furos na posição final (F)	Altura dos furos em dupla camada (D)
	3,0		0,40909	1,56	1,56	3,12
3x3 quadrada	4,0	7,33333	0,54545	1,56	1,56	3,12
	5,0		0,68182	1,56	1,56	3,12

Fonte: Autoria própria, 2025.

As estruturas FSS adotadas como padrão de referência, a saber: espira quadrada, anel circular e dipolo cruzado; bem como todas as outras estruturas incluindo as de substrato triplicado e de presença das malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG para todos os diâmetros adotados estão mostradas nas figuras a seguir, como forma de melhor entender e visualizar os projetos adotados neste trabalho. Na Figura 18 é mostrado o projeto da espira quadrada de referência e de substrato triplicado, as dimensões das estruturas estão mostradas na Tabela 1.

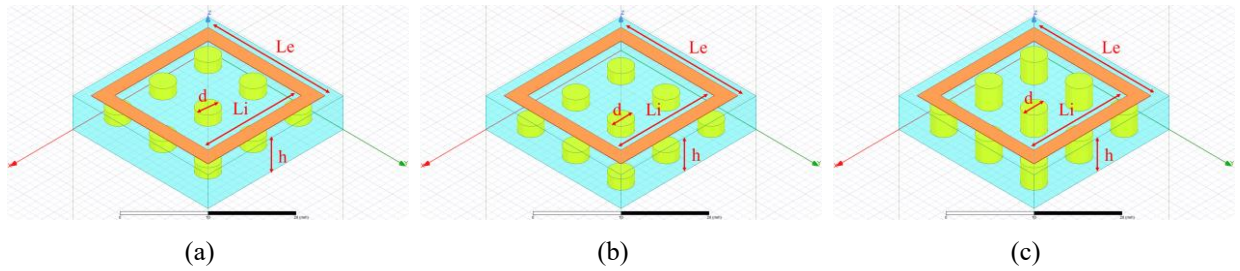
Figura 18 – Projeto das estruturas FSS espira quadrada (a) referência e (b) substrato triplicado.



Fonte: Autoria própria, 2025.

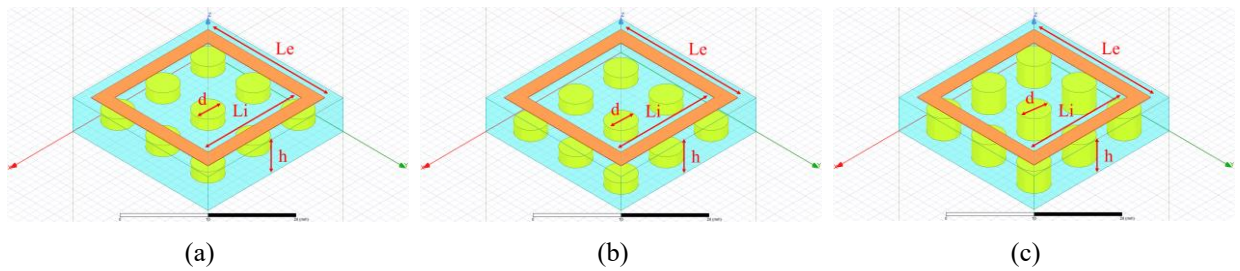
Na Figura 19 é mostrado o projeto da espira quadrada com a presença da malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro de 3mm e suas respectivas variações com relação ao posicionamento dos furos. Nas Figuras 20 e 21 são mostrados os projetos da espira quadrada com a malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro de 4mm, 5mm e suas respectivas variações com relação ao posicionamento dos furos, respectivamente. As dimensões das estruturas estão mostradas na Tabela 1.

Figura 19 – Projeto das estruturas FSS espira quadrada com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 3mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.



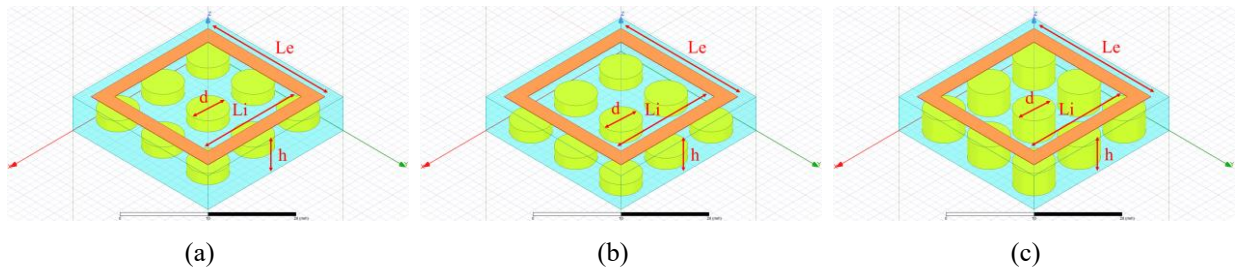
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 20 – Projeto das estruturas FSS espira quadrada com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 4mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.



Fonte: Autoria própria, 2025.

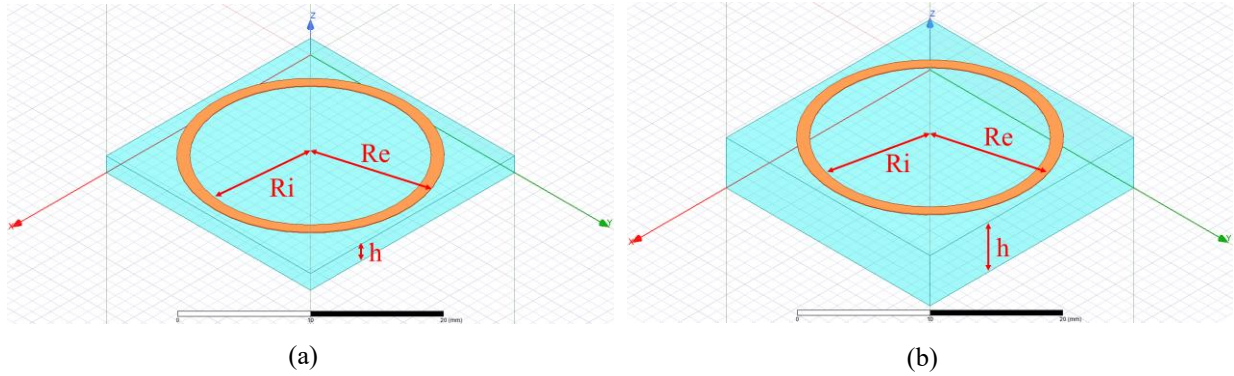
Figura 21 – Projeto das estruturas FSS espira quadrada com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 5mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 22 é observado o projeto do anel circular de referência e a de Substrato triplicado, as dimensões das estruturas estão mostradas na Tabela 1.

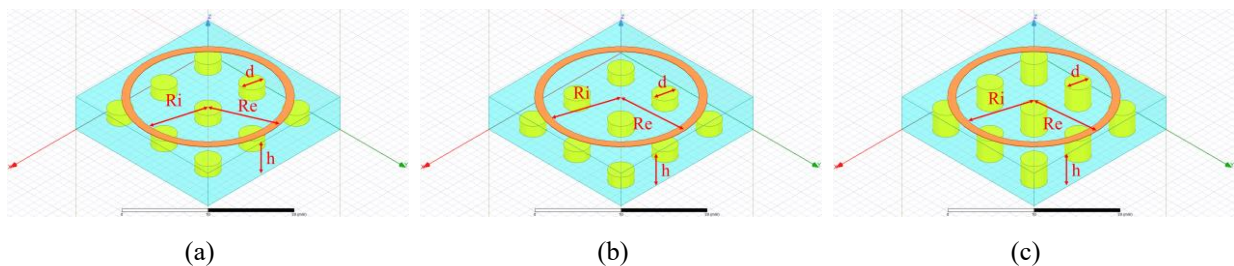
Figura 22 – Projeto das estruturas FSS anel circular (a) referência e (b) Substrato triplicado.



Fonte: Autoria própria, 2025.

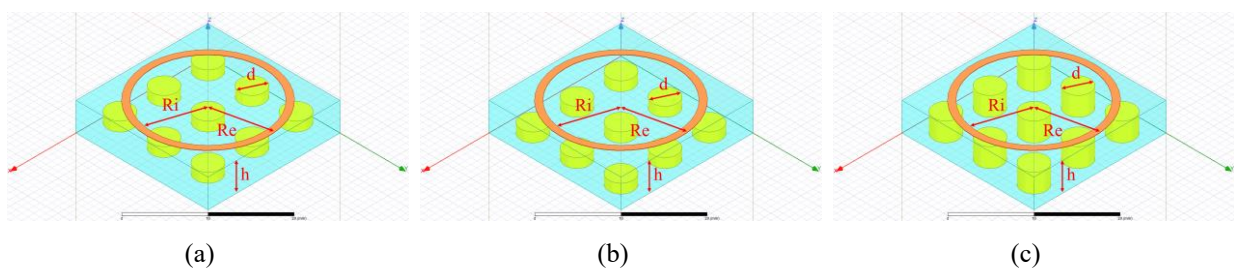
Na Figura 23 é possível verificar o projeto do anel circular com a presença da malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro de 3mm e suas respectivas variações com relação ao posicionamento dos furos. Nas Figuras 24 e 25 são mostrados os projetos do anel circular com a malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro de 4mm, 5mm e suas respectivas variações com relação ao posicionamento dos furos, respectivamente. As dimensões das estruturas estão mostradas na Tabela 1.

Figura 23 – Projeto das estruturas FSS anel circular com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 3mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.



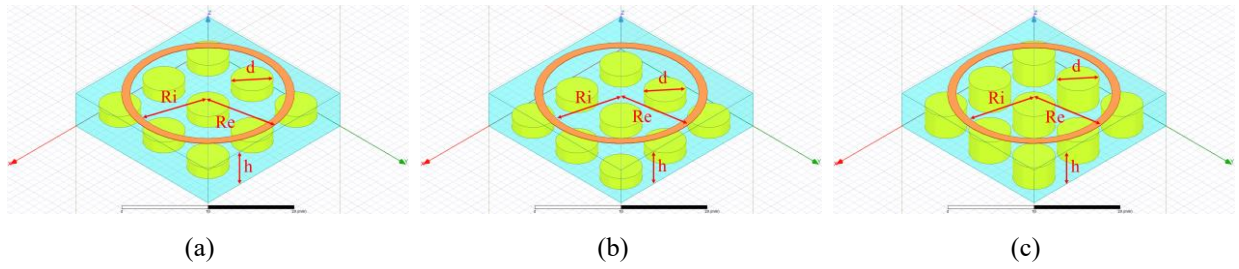
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 24 – Projeto das estruturas FSS anel circular com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 4mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.



Fonte: Autoria própria, 2025.

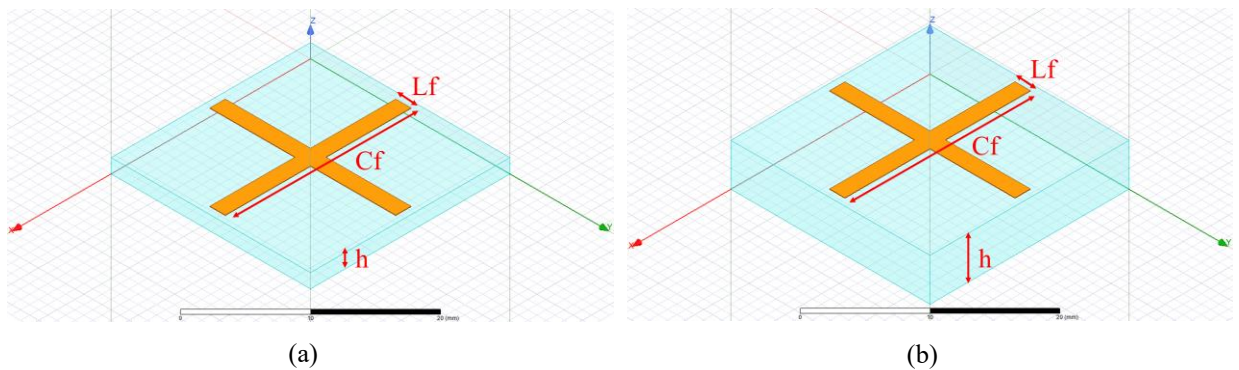
Figura 25 – Projeto das estruturas FSS anel circular com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 5mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 26 é mostrado o projeto do dipolo cruzado de referência e a de substrato triplicado, as dimensões das estruturas estão mostradas na Tabela 1.

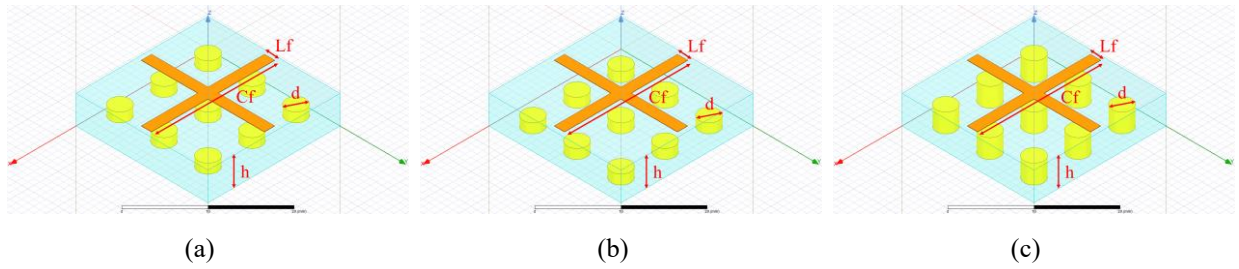
Figura 26 – Projeto das estruturas FSS dipolo cruzado (a) referência e (b) Substrato triplicado.



Fonte: Autoria própria, 2025.

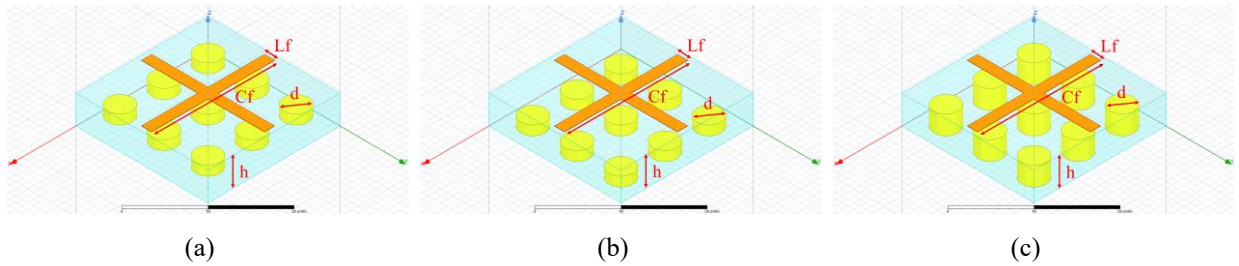
Na Figura 27 é possível verificar o projeto do dipolo cruzado com a presença da malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro de 3mm e suas respectivas variações com relação ao posicionamento dos furos. Nas Figuras 28 e 29 são mostrados os projetos do dipolo cruzado com a malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro de 4mm, 5mm e suas respectivas variações com relação ao posicionamento dos furos, respectivamente. As dimensões das estruturas estão mostradas na Tabela 1.

Figura 27 – Projeto das estruturas FSS dipolo cruzado com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 3mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.



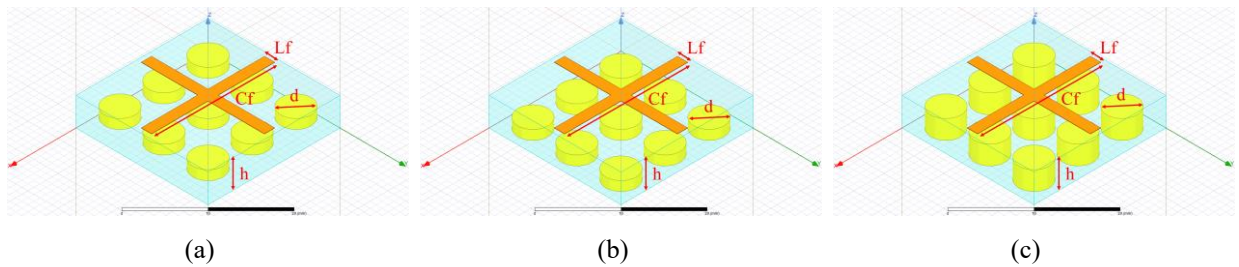
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 28 – Projeto das estruturas FSS dipolo cruzado com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 4mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 29 – Projeto das estruturas FSS dipolo cruzado com a presença da malha/rede inspirada em EBG com diâmetro de 5mm (a) furos na posição do meio, (b) furos na posição final e (c) furos em dupla camada.



Fonte: Autoria própria, 2025.

3.4 Análise de dados simulados e estudos paramétricos

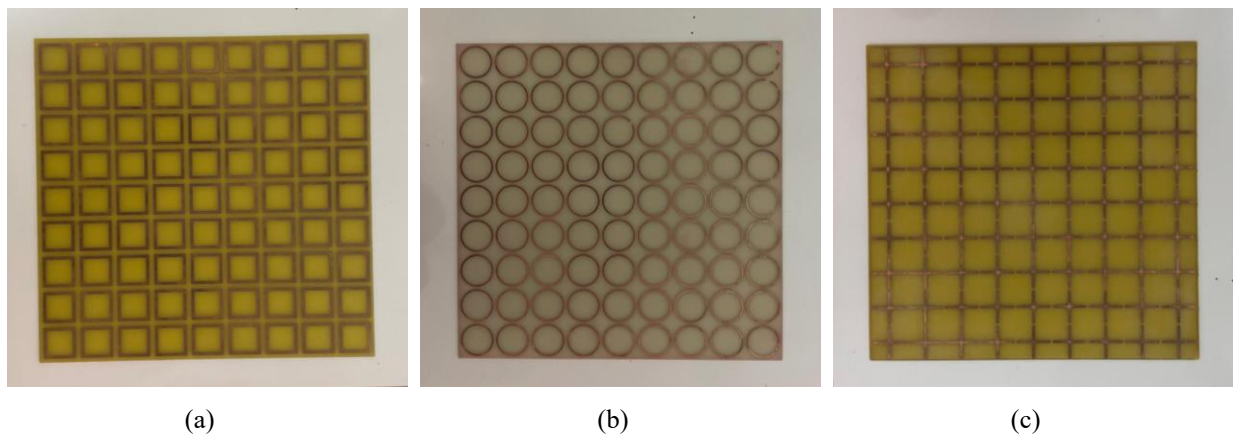
Após a etapa de modelagem e simulação das estruturas FSS padrão (espira quadrada, anel circular e dipolo cruzado) e das diversas variações com uso de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG distintas, bem como as respectivas variações no posicionamento dos furos ao longo do substrato dielétrico, com uso do *software Ansoft HFSS®*, foram analisados os dados obtidos e então realizados estudos paramétricos comparativos entre as diversas estruturas simuladas a fim de se observar o comportamento associado à presença e as variações nas malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG na resposta em frequência. De posse da

análise dos dados obtidos, a próxima etapa consistiu na construção/confecção de todas as estruturas FSS propostas e suas variações.

3.5 Construção dos dispositivos simulados

Os elementos condutores metálicos das FSS foram confeccionados com uso de fita de cobre, onde essa fita está presente na placa de FR4 adotada como substrato e tal fita serve como uma cobertura metálica de 0,05mm de espessura. O desenho das geometrias das FSS, projetados no *software Ansoft HFSS®* e exportadas para *software* de desenho compatível, foi realizado sobre a fita de cobre através de máquina de impressão com uso de dupla camada de tinta isolante a fim de proteger o elemento condutor que fique em contato com o jato de impressão. O restante do material metálico foi removido com uso de processo de corrosão através da aplicação de solução química de Percloreto de Ferro (FeCl_3) em conformidade com a metodologia utilizada comumente na literatura. As FSS adotadas como padrão de referência, a saber: FSS espira quadrada, FSS anel circular e FSS dipolo cruzado; estão mostradas na Figura 30, devidamente confeccionadas após a execução dos processos supracitados.

Figura 30 – Estruturas FSS adotadas como padrão de referência devidamente confeccionadas, a saber: (a) FSS espira quadrada, (b) FSS anel circular e (c) dipolo cruzado.



Fonte: Autoria própria, 2025.

As malhas/redes inspiradas em EBG foram confeccionadas utilizando-se as mesmas placas FR4 com cobertura metálica de cobre de 0,05mm utilizadas para o projeto das FSS adotadas como padrão de referência, no entanto, essa parte metálica só foi removida no processo que se utiliza Percloreto de Ferro (FeCl_3), após a execução das furações utilizando-se furadeira elétrica do tipo CNC (Comando Numérico Computadorizado) e fazendo-se uso

de brocas para aço rápido com os diâmetros apropriados para os projetos das estruturas propostas, sendo eles de: 3mm, 4mm e 5mm. Isso se deu porque durante o processo de execução das furações que serviriam como malhas/redes inspiradas em EBG utilizando a placa de FR4 sem a cobertura metálica, o atrito da broca no material sem a proteção metálica acabava queimando os furos e danificando os mesmos, onde só foi possível executar os furos com a permanência da fita metálica.

A furadeira elétrica do tipo CNC (Comando Numérico Computadorizado) utilizada para a execução das furações das placas possui as seguintes características gerais: CNC Router, Spindler 2.2 kW com refrigeração a ar, movimentação por guias lineares de patins de 20mm no eixo X, guias lineares de patins de 15mm no eixo Y, movimentação por eixo retificado de 20mm com pilow block no eixo Z, motores de passo de 30 kgf para os eixos X e Y com redutores tipo planetário 5/1 e uso de Drivers digitais DM 556, fontes de suprimento de energia de 50 Volts, *software Aspire 10.5* para criar o percurso, *software Mach3* para executar e uso de interface RNR ecomotion. Na Figura 31 é mostrada a furadeira elétrica CNC utilizada para a confecção das furações de todas as variações propostas para os diferentes diâmetros dos furos das malhas/redes inspiradas em EBG adotadas neste trabalho.

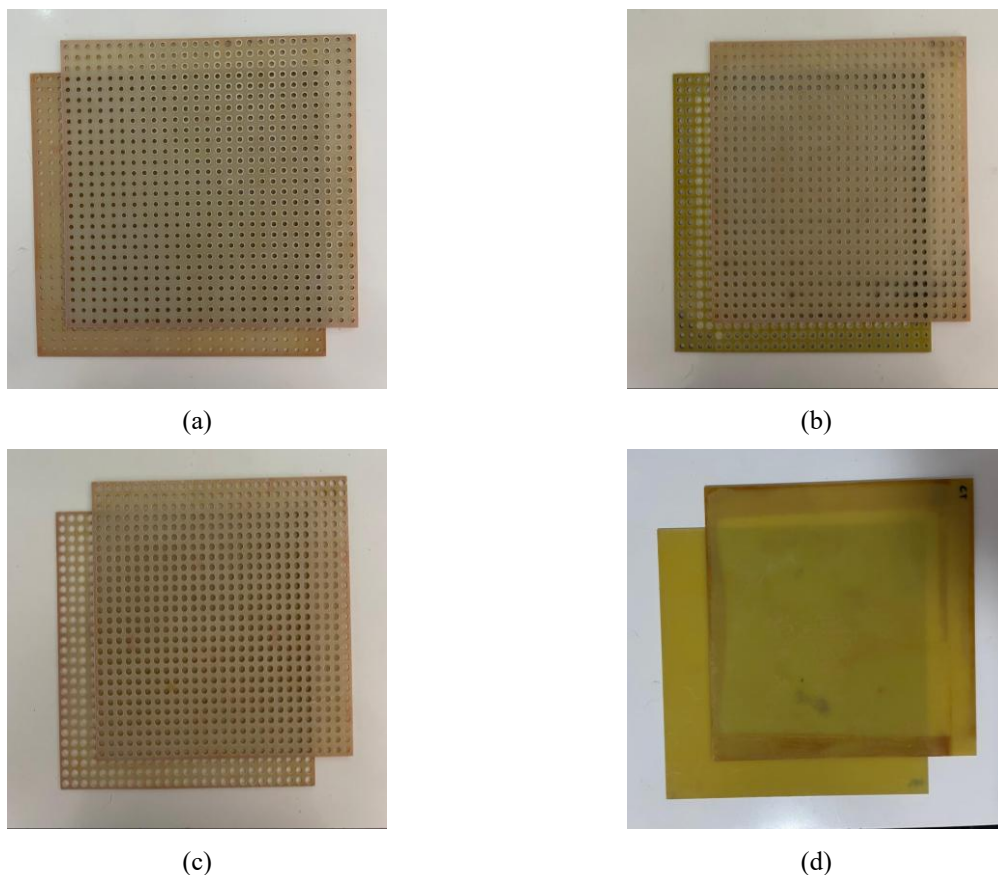
Figura 31 – Furadeira elétrica tipo CNC (Comando Numérico Computadorizado) utilizada para a execução das furações de todas as malhas/redes inspiradas em EBG deste trabalho.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Para atendimento de todas as variações propostas neste trabalho, foram necessários executar a furação em seis placas de FR4 com cobertura metálica, onde foram duas placas furadas com broca de aço rápido de 3mm de diâmetro, duas placas com broca de aço rápido de 4mm de diâmetro e duas placas com broca de aço rápido de 5mm de diâmetro. Isso se deu em virtude de existirem variações de malhas/redes inspiradas em EBG adotadas neste trabalho que irão utilizar duas placas furadas. Para o caso em que só se utilizou uma placa furada, o complemento do substrato foi realizado com uso de placa de FR4 virgem sem a cobertura metálica. Após a execução dos trabalhos de furação, as placas passaram pelo processo de corrosão em Percloreto de Ferro (FeCl_3) e processo de lixamento manual para remoção de resquícios metálicos e arestas de FR4 provenientes dos furos e do processo de furação. As malhas/redes inspiradas em EBG propostas neste trabalho devidamente confeccionadas estão mostradas na Figura 32.

Figura 32 – Malhas/redes inspiradas em EBG propostas neste trabalho devidamente confeccionadas onde: (a) furos com diâmetro de 3mm, (b) furos com diâmetro de 4mm, (c) furos com diâmetro de 5mm e (d) sem furos.



Fonte: Autoria própria, 2025.

3.6 Montagem e execução do *setup* de medição

Com as estruturas devidamente construídas a próxima etapa foi a de montagem dos equipamentos e acessórios do *setup* de medição e, em seguida, a execução desta. As medições seguiram o método de transmissão e reflexão no espaço livre, no intervalo de frequência de 1,0 a 6,0 GHz utilizando-se de duas antenas do tipo Vivaldi 7dBi, banda larga TEM, 10W de potência, fabricadas em PCB operando na faixa de 1,4 ~ 10,5 GHz, montadas em bases de apoio fixas sobre um suporte metálico, cabos e conectores apropriados, sendo os cabos apropriados para micro-ondas com blindagem em espiral, RF de baixa perda, referência RG-40555 MC17077710 (tipo SS405), um suporte metálico com base sobre rodas contendo os absorvedores, local para a conexão das estruturas FSS e as malhas/redes inspiradas em EBG e um analisador de redes vetoriais (VNA, do inglês *Vector Network Analyzer*) referência VNA R&S® ZND 100 kHz-8,5 GHz, a fim de se validar os resultados obtidos na etapa de simulação computacional através das medições realizadas. A Figura 33 mostra o *setup* montado com todos os equipamentos e acessórios descritos para realizar as medições nas FSS propostas.

Figura 33 – *Setup* de medição devidamente montado e em processo de execução de medição.



Fonte: Autoria própria, 2025.

3.7 Análise de dados medidos, estudos paramétricos e conclusões

A etapa final consistiu na realização de estudo paramétrico e análise comparativa da resposta em frequência das estruturas FSS projetadas e das variações propostas neste trabalho incluindo a inserção de malhas/redes inspiradas em EBG, tanto para resultados no ambiente de simulação quanto para resultados experimentais/medidos, observando os seguintes parâmetros: frequência de ressonância (f_r), coeficiente de transmissão (S_{21}), largura de banda (BW) e densidade superficial de corrente elétrica (J) – apenas para os resultados simulados – nos elementos condutores; sendo estes parâmetros analisados tanto em polarização TE (polarização vertical) como em polarização TM (polarização horizontal).

Com base nos resultados obtidos nas etapas de simulação e de medição, procedeu-se com o estudo de investigação do comportamento da resposta em frequência e execução de análise verificando a correspondência entre os resultados simulados e medidos, a fim de se validar os dados, fazer a devida correlação e ter resultados conclusivos sobre a real influência da inserção de malhas/redes inspiradas em EBG obtendo-se assim as considerações de ordem teórica e práticas, a fim de se chegar nas conclusões acerca do trabalho desenvolvido e subsidiar a comunidade acadêmica sobre esse estudo em questão.

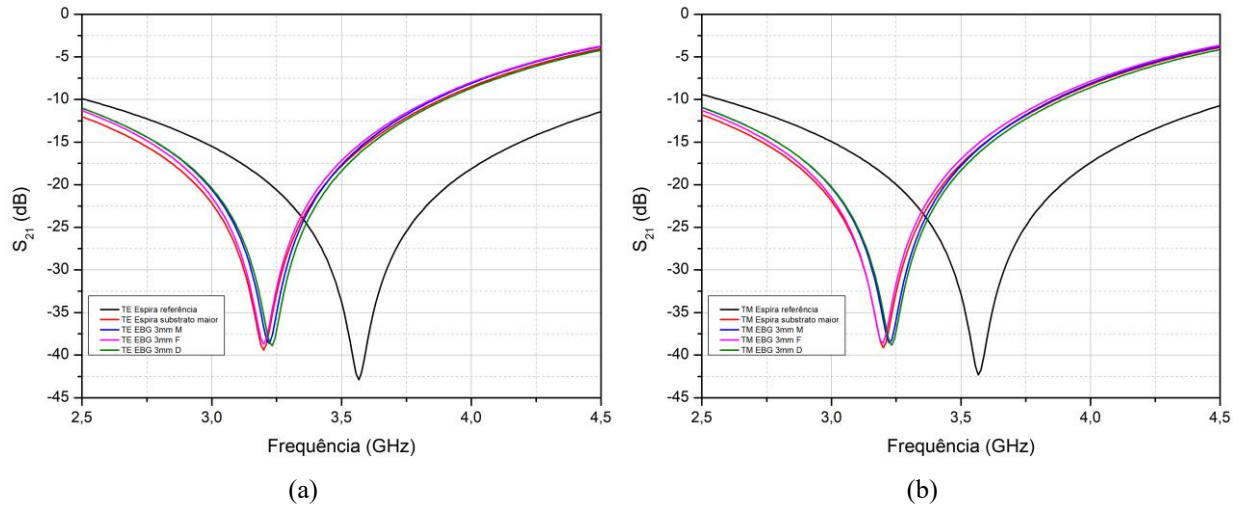
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados simulados

Para tornar a análise mais eficiente e demonstrar a influência das configurações de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG na resposta em frequência da FSS espira quadrada, anel circular e dipolo cruzado, todas de referência, foi realizado o estudo comparativo entre o desempenho das FSS padrão de referência, das FSS de substrato triplicado e das variações das posições dos furos (e altura) em cada diâmetro definido, a saber: 3mm, 4mm e 5mm; com incidência normal da onda eletromagnética tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal). Os gráficos gerados que foram obtidos através dos dados das simulações realizadas no *software Ansoft HFSS®* seguiram o teorema de Floquet, adotando o intervalo de frequência de 1,0 a 6,0 GHz com 451 pontos, no entanto, estes foram adequados para mostrar uma faixa de frequência onde se possa verificar a influência das variações adotadas tanto na altura do substrato como no uso das diferentes malhas/redes inspiradas em EBG para todas as estruturas FSS consideradas.

Na Figura 34 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS espira quadrada de referência, de substrato triplicado e das variações com relação a posição dos furos no substrato dielétrico para a malha/rede inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

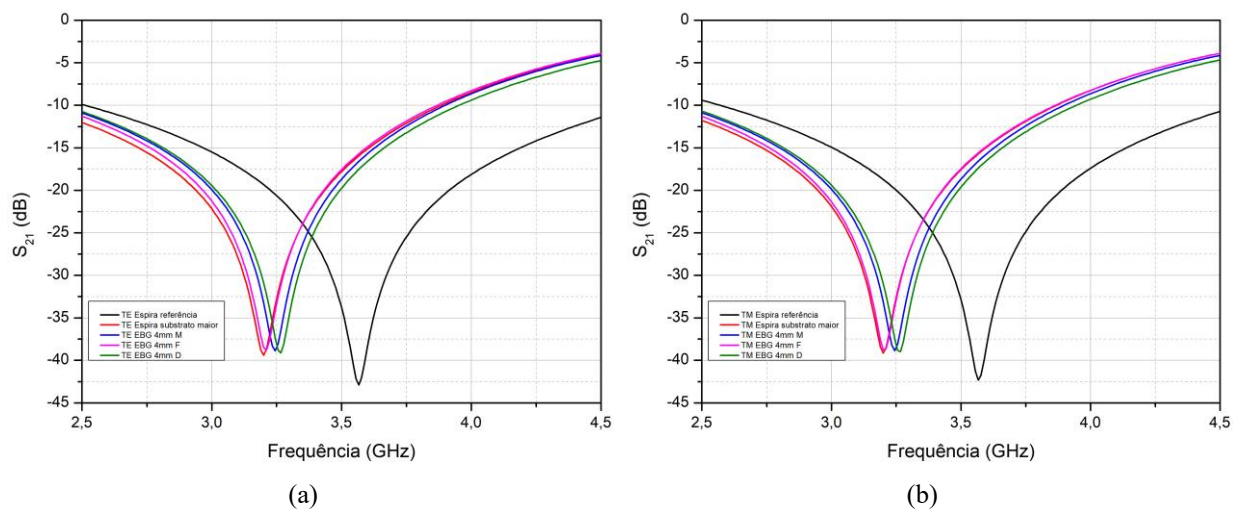
Figura 34 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) da FSS espira quadrada de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 3mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 35 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS espira quadrada de referência, semelhante ao realizado anteriormente. No entanto, a análise agora é para a malha/rede inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 35 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) da FSS espira quadrada de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 4mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.

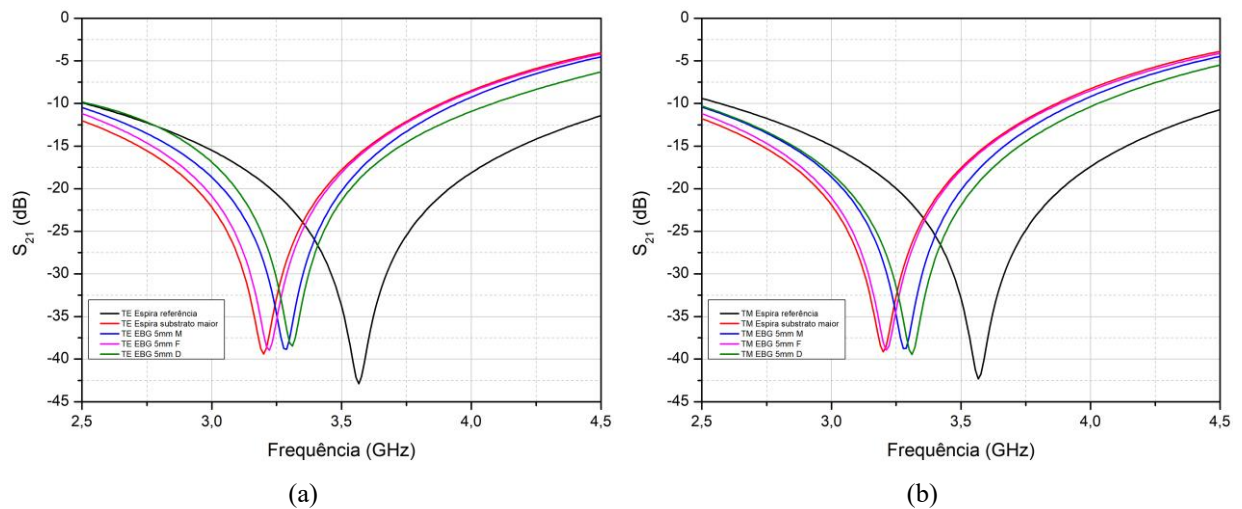


Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 36 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS espira quadrada de referência, semelhante ao realizado anteriormente. No entanto, a análise

agora é para a malha/rede inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 36 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) da FSS espira quadrada de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 5mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Com base nas simulações realizadas e nos gráficos apresentados foi possível perceber que houve uma variação na frequência de ressonância (f_r) quando se compara o projeto da espira quadrada adotada como padrão de referência com as mudanças propostas tanto na altura do substrato como nas variações do posicionamento dos furos (e altura deles) das malhas/redes inspiradas em EBG adotadas, considerando incidência normal da onda eletromagnética para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal). A espira quadrada de referência apresentou um valor para o coeficiente de transmissão (S_{21}) de -42,8879 dB na frequência de ressonância (f_r) de 3,5667 GHz (frequência de projeto) na polarização TE (vertical), além de uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 2,15 GHz. Para a polarização TM (horizontal), a espira quadrada de referência apresentou um valor de S_{21} de -42,3364 dB na frequência f_r de 3,5667 GHz (frequência de projeto), com uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 2,01 GHz.

As mudanças observadas na resposta em frequência seguiram um comportamento semelhante tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal) e a medida que os diâmetros das malhas/redes EBG iam aumentando foi possível verificar que a

frequência ia se aproximando da frequência de ressonância do projeto da espira quadrada de referência, e a largura de banda para valores abaixo de -10 dB também ia aumentando discretamente, porém ainda menor do que a largura de banda da espira adotada como referência e com a estrutura com substrato triplicado. Em todos os gráficos foi percebido o maior deslocamento na f_r para as estruturas FSS com substrato triplicado, sem a presença de estruturas inspiradas em EBG, onde em ambas as polarizações TE e TM a f_r foi de 3,2000 GHz, representando uma diferença na frequência de 0,3667 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 10,2812%), e os valores de S_{21} foram de -39,4091 dB e -39,1411 dB, respectivamente. Para essas estruturas os valores de BW sofreram uma diminuição (estreitamento) para valores abaixo de -10 dB, sendo de 1,58 GHz para polarização TE e de 1,55 GHz para polarização TM.

Observando as respostas em frequência das malhas/redes inspiradas em EBG, considerando o diâmetro do furo de 3mm a frequência mais distante da frequência de ressonância de projeto foi para a estrutura com os furos na posição F (final do substrato) sendo de 3,2000 GHz tanto para a polarização TE quanto para a polarização TM, representando uma diferença na frequência de 0,3667 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 10,2812%), apresentando valores de S_{21} de -38,7303 dB e -38,5911 dB, respectivamente. Para as estruturas com os furos na posição M (meio do substrato) e posição D (dupla camada) foram observadas as f_r de 3,2222 GHz (S_{21} de -38,6331 dB) e 3,2333 GHz (S_{21} de -38,9178 dB), respectivamente, na polarização TE. Para a polarização TM foi obtida uma f_r de 3,2222 GHz (S_{21} de -38,5541 dB) para posição M e uma f_r de 3,2333 GHz (S_{21} de -38,8543 dB) para a posição D. Os deslocamentos relativos de frequência para a polarização TE e para polarização TM foram idênticos, apresentando valores de 9,6588% (diferença de 0,3445 GHz) para a posição M e de 9,3476% (diferença de 0,3334 GHz) para a posição D. Os valores de BW na polarização TE foram de 1,46 GHz, 1,48 GHz, 1,50 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM os valores foram de 1,45 GHz, 1,46 GHz e 1,48 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

Para o diâmetro de 4mm a frequência mais distante da frequência de ressonância de projeto também foi para a estrutura com os furos na posição F sendo f_r de 3,2111 GHz para a polarização TE e de 3,2000 GHz para a polarização TM, representando uma diferença na frequência de 0,3556 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 9,9700%) para TE e de 0,3667 GHz (deslocamento relativo de 10,2812%) para TM, apresentando os respectivos valores de coeficiente S_{21} de -38,7947 dB e de -38,7382 dB. Para as estruturas com os furos

na posição M e posição D foram obtidas as f_r de 3,2444 GHz (S_{21} de -38,8983 dB) e 3,2667 GHz (S_{21} de -39,1181 dB), respectivamente, na polarização TE. Para a polarização TM foi obtida uma f_r de 3,2444 GHz (S_{21} de -38,8704 dB) para posição M e uma f_r de 3,2667 GHz (S_{21} de -38,9840 dB) para a posição D. Os deslocamentos relativos de frequência para a polarização TE e para polarização TM foram idênticos, apresentando valores de 9,0364% (diferença de 0,3223 GHz) para a posição M e de 8,4111% (diferença de 0,3000 GHz) para a posição D. Os valores de BW na polarização TE foram de 1,49 GHz, 1,49 GHz, 1,52 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM os valores foram de 1,49 GHz, 1,49 GHz e 1,52 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

Finalmente para o caso das estruturas com diâmetro de 5mm a frequência mais distante da frequência de ressonância de projeto novamente foi para a estrutura com os furos na posição F sendo f_r de 3,2222 GHz para a polarização TE e de 3,2111 GHz para a polarização TM, representando uma diferença na frequência de 0,3445 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 9,6588%) para TE e de 0,3556 GHz (deslocamento relativo de 9,9700%) para TM, apresentando os respectivos valores de coeficiente S_{21} de -38,9754 dB e de -38,9604 dB. Para as estruturas com os furos na posição M e posição D foram obtidas as f_r de 3,2889 GHz (S_{21} de -38,8463 dB) e 3,3111 GHz (S_{21} de -38,4789 dB), respectivamente, na polarização TE. Para a polarização TM foi obtida uma f_r de 3,2778 GHz (S_{21} de -38,7794 dB) para posição M e uma f_r de 3,3111 GHz (S_{21} de -39,4686 dB) para a posição D. Os deslocamentos relativos de frequência para a polarização TE foram de 7,7887% (diferença de 0,2778 GHz) para a posição M e de 7,1663% (diferença de 0,2556 GHz) para posição D. Para a polarização TM os valores foram de 8,0999% (diferença de 0,2889 GHz) para a posição M e idêntico ao valor da polarização TE no caso da posição D. Os valores de BW na polarização TE foram de 1,50 GHz, 1,51 GHz, 1,56 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM os valores foram de 1,48 GHz, 1,49 GHz e 1,56 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

De maneira geral foi observado nas simulações e nos resultados destas através dos gráficos apresentados que o simples fato de aumentar a altura do substrato dielétrico da estrutura FSS espira quadrada padrão de referência gerou uma diminuição na frequência de ressonância do dispositivo, bem como uma diminuição (estreitamento) na largura de banda, tanto para a polarização TE quanto para a polarização TM. A aplicação das malhas/redes inspiradas em EBG ao longo desse substrato dielétrico triplicado geraram uma nova mudança na frequência de ressonância, fazendo com que o comportamento da resposta em frequência

fosse diferente para cada posição adotada para os furos, ou seja, para as posições no meio do substrato (M), no final do substrato (F) e com uso de dupla camada (D).

Para os furos na posição F, observou-se que o comportamento foi semelhante a resposta das estruturas FSS com substrato triplicado, no entanto, à medida que o diâmetro dos furos vai aumentando a frequência de ressonância f_r vai se deslocando em direção a frequência de ressonância do dispositivo adotado como padrão de referência, evidenciando a influência que os furos causam na resposta do dispositivo. Para os furos na posição M verificou-se uma frequência de ressonância superior em comparação a posição F e, novamente, à medida que o diâmetro dos furos vai aumentando a frequência de ressonância f_r vai subindo. Entre a posição dos furos adotadas a que apresentou a maior frequência de ressonância foi a posição D, onde esta frequência também vai subindo à medida que o diâmetro dos furos vai aumentando. Com relação a largura de banda, a posição D foi a que apresentou o maior valor, tanto na polarização TE quanto na polarização TM, mesmo ainda sendo inferior à do dispositivo com substrato triplicado e da FSS padrão de referência.

Os resultados das respostas em frequência contendo os parâmetros de frequência de ressonância (f_r), coeficiente de transmissão (S_{21}) e largura de banda (BW) obtidos nas simulações realizadas e otimizadas no *software Ansoft HFSS®* e descritos anteriormente para a FSS espira quadrada de referência, espira de substrato triplicado e as demais configurações propostas incluindo as malhas/redes inspiradas em EBG e as suas respectivas variações na posição dos furos no interior do substrato estão contidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados simulados das respostas em frequência da FSS espira quadrada de referência, espira de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.

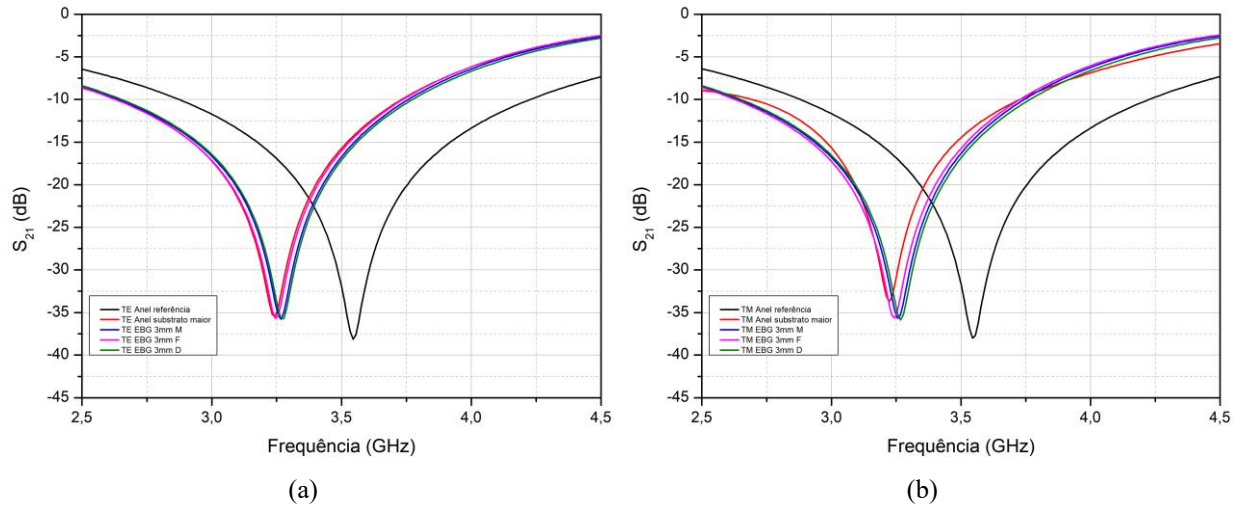
Estrutura	Frequência (GHz)		S_{21} (dB)		BW (GHz)	
	TE	TM	TE	TM	TE	TM
FSS espira quadrada referência	3,5667	3,5667	-42,8879	-42,3364	2,15	2,01
FSS substrato triplicado	3,2000	3,2000	-39,4091	-39,1411	1,58	1,55
FSS EBG 3mm – M	3,2222	3,2222	-38,6331	-38,5541	1,46	1,45

FSS EBG 3mm – F	3,2000	3,2000	-38,7303	-38,5911	1,48	1,46
FSS EBG 3mm – D	3,2333	3,2333	-38,9178	-38,8543	1,50	1,48
FSS EBG 4mm – M	3,2444	3,2444	-38,8983	-38,8704	1,49	1,49
FSS EBG 4mm – F	3,2111	3,2000	-38,7947	-38,7382	1,49	1,49
FSS EBG 4mm – D	3,2667	3,2667	-39,1181	-38,9840	1,52	1,52
FSS EBG 5mm – M	3,2889	3,2778	-38,8463	-38,7794	1,50	1,48
FSS EBG 5mm – F	3,2222	3,2111	-38,9754	-38,9604	1,51	1,49
FSS EBG 5mm – D	3,3111	3,3111	-38,4789	-39,4686	1,56	1,56

Fonte: Autoria própria, 2025.

As simulações realizadas para as estruturas FSS espira quadrada também foram executadas para as estruturas FSS anel circular. Na Figura 37 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS anel circular de referência, de substrato triplicado e das variações com relação a posição dos furos no substrato dielétrico para a malha/rede inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

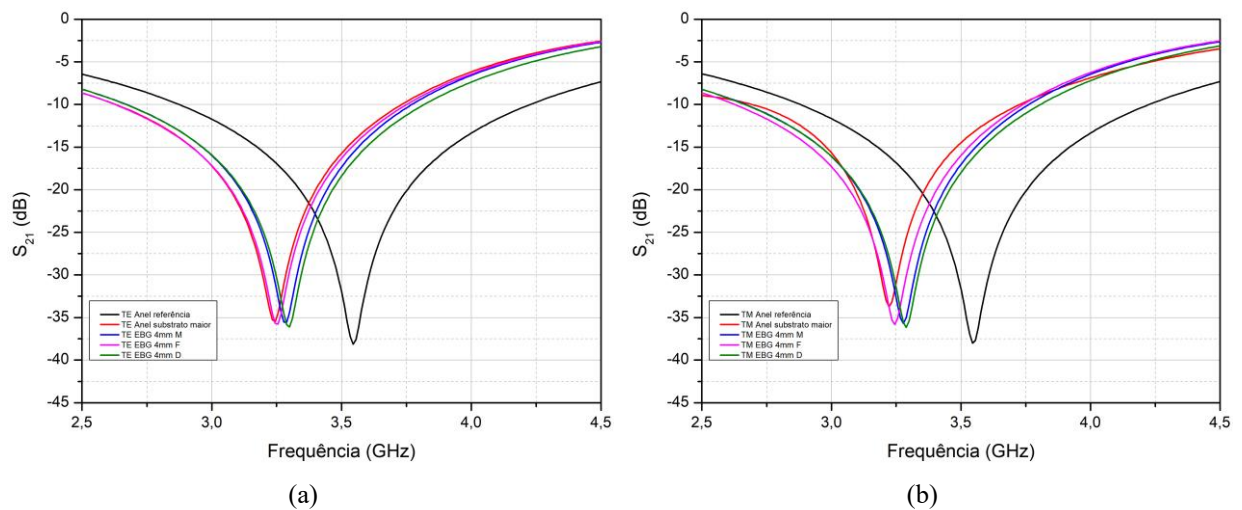
Figura 37 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) da FSS anel circular de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 3mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 38 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS anel circular de referência, semelhante ao realizado anteriormente. No entanto, a análise agora é para a malha/rede inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 38 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) da FSS anel circular de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 4mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



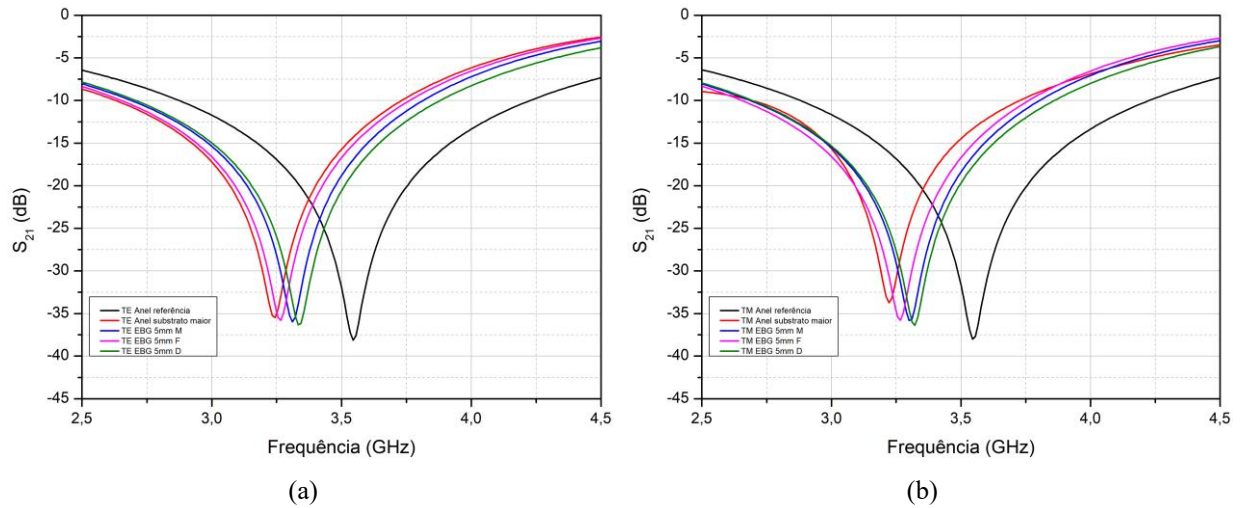
Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 39 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS anel circular de referência, semelhante ao realizado anteriormente. No entanto, a análise agora

é para a malha/rede inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 39 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) da FSS anel circular de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 5mm para (a) Polarização TE e (b)

Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Assim como aconteceu com a FSS espira quadrada foi possível perceber uma variação na frequência de ressonância (f_r) quando se compara o projeto do anel circular adotado como padrão de referência com as mudanças propostas tanto na altura do substrato como nas variações do posicionamento dos furos (e altura deles) das malhas/redes inspiradas em EBG adotadas, considerando incidência normal da onda eletromagnética para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal). O anel circular de referência apresentou um valor para o coeficiente de transmissão (S_{21}) de -38,1361 dB na frequência de ressonância (f_r) de 3,5444 GHz (bem próximo a frequência de projeto) na polarização TE, além de uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 1,36 GHz. Para a polarização TM, o anel circular de referência apresentou um valor de S_{21} de -38,0222 dB na frequência f_r de 3,5444 GHz (bem próximo a frequência de projeto), com uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 1,35 GHz.

As alterações na resposta em frequência apresentaram comportamento semelhante ao da espira quadrada nas polarizações TE (vertical) e TM (horizontal). À medida que os diâmetros das malhas EBG aumentaram, a frequência se aproximou da frequência de

ressonância do anel circular de referência, enquanto a largura de banda abaixo de -10 dB aumentou discretamente em relação à estrutura com substrato triplicado, mas permaneceu inferior à do anel circular de referência. Em todos os gráficos observou-se o maior deslocamento na f_r para as estruturas FSS com substrato triplicado, sem a presença de estruturas inspiradas em EBG, onde para a polarização TE a f_r foi de 3,2444 GHz (S_{21} de -35,4922), representando uma diferença na frequência de 0,3000 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 8,4640%), e para a polarização TM a f_r foi de 3,2222 GHz (S_{21} de -33,7591), representando uma diferença na frequência de 0,3222 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 9,0904%). Para essas estruturas os valores de BW sofreram uma diminuição (estreitamento) para valores abaixo de -10 dB, sendo de 1,10 GHz para polarização TE e de 1,04 GHz para polarização TM.

Observando as respostas em frequência das malhas/redes inspiradas em EBG, considerando o diâmetro do furo de 3mm a frequência mais distante da frequência de ressonância de projeto foi para a estrutura com os furos na posição F (final do substrato) sendo de 3,2444 GHz tanto para a polarização TE quanto para a polarização TM, representando uma diferença na frequência de 0,3000 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 8,4640%), apresentando valores de S_{21} de -35,6918 dB e -35,6696 dB, respectivamente. Para as estruturas com os furos na posição M (meio do substrato) e posição D (dupla camada) foram observadas as f_r de 3,2667 GHz (S_{21} de -35,7906 dB) e 3,2667 GHz (S_{21} de -35,7252 dB), respectivamente, na polarização TE. Para a polarização TM foi obtida uma f_r de 3,2556 GHz (S_{21} de -35,7011 dB) para posição M e uma f_r de 3,2667 GHz (S_{21} de -35,8660 dB) para a posição D. Os deslocamentos relativos de frequência para a polarização TE foram de 7,8349% (diferença de 0,2777 GHz) para ambas as posições M e D. Para a polarização TM os deslocamentos foram de 8,1481% (diferença de 0,2888 GHz) para a posição M e de 7,8349% (diferença de 0,2777 GHz) para a posição D. Os valores de BW na polarização TE foram de 1,12 GHz, 1,11 GHz, 1,12 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM os valores foram de 1,10 GHz, 1,10 GHz e 1,12 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

Para o diâmetro de 4mm a frequência mais distante da frequência de ressonância de projeto também foi para a estrutura com os furos na posição F sendo f_r de 3,2556 GHz para a polarização TE e de 3,2444 GHz para a polarização TM, representando uma diferença na frequência de 0,2888 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 8,1481%) para TE e de 0,3000 GHz (deslocamento relativo de 8,4640%) para TM, apresentando os respectivos

valores de coeficiente S_{21} de -35,7631 dB e de -35,8399 dB. Para as estruturas com os furos na posição M e posição D foram obtidas as f_r de 3,2889 GHz (S_{21} de -35,5731 dB) e 3,3000 GHz (S_{21} de -36,1118 dB), respectivamente, na polarização TE. Para a polarização TM foi obtida uma f_r de 3,2778 GHz (S_{21} de -35,7010 dB) para posição M e uma f_r de 3,2889 GHz (S_{21} de -36,1520 dB) para a posição D. Os deslocamentos relativos de frequência para a polarização TE foi de 7,2086% (diferença de 0,2555 GHz) para a posição M e de 6,8954% (diferença de 0,2444 GHz) para a posição D. Para a polarização TM os deslocamentos foram de 7,5217% (diferença de 0,2666 GHz) para a posição M e de 7,2086% (diferença de 0,2555 GHz) para a posição D. Os valores de BW na polarização TE foram de 1,10 GHz, 1,12 GHz, 1,15 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM os valores foram de 1,09 GHz, 1,11 GHz e 1,14 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

Finalmente para o caso das estruturas com diâmetro de 5mm a frequência mais distante da frequência de ressonância de projeto novamente foi para a estrutura com os furos na posição F sendo f_r de 3,2667 GHz para ambas as polarizações TE e TM, representando uma diferença na frequência de 0,2777 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 7,8349%) para ambas as polarizações, apresentando os respectivos valores de coeficiente S_{21} de -35,7972 dB e de -35,7910 dB. Para as estruturas com os furos na posição M e posição D foram obtidas as f_r de 3,3111 GHz (S_{21} de -35,9924 dB) e 3,3333 GHz (S_{21} de -36,3528 dB), respectivamente, na polarização TE. Para a polarização TM foi obtida uma f_r de 3,3000 GHz (S_{21} de -35,8268 dB) para posição M e uma f_r de 3,3222 GHz (S_{21} de -36,4051 dB) para a posição D. Os deslocamentos relativos de frequência para a polarização TE foram de 6,5822% (diferença de 0,2333 GHz) para a posição M e de 5,9559% (diferença de 0,2111 GHz) para posição D. Para a polarização TM os valores foram de 6,8954% (diferença de 0,2444 GHz) para a posição M e de 6,2690% (diferença de 0,2222 GHz) para a posição D. Os valores de BW na polarização TE foram de 1,12 GHz, 1,11 GHz, 1,17 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM os valores foram de 1,11 GHz, 1,11 GHz e 1,16 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

De modo geral, as simulações mostraram que o aumento da altura do substrato dielétrico da FSS com anel circular de referência reduziu a frequência de ressonância e estreitou a largura de banda, tanto nas polarizações TE quanto TM. A introdução das malhas EBG nesse substrato triplicado provocou novas alterações na frequência de ressonância, resultando em respostas distintas conforme a posição dos furos: no meio (M), no final (F) ou em dupla camada (D).

Para os furos na posição F, o comportamento foi semelhante ao da FSS com substrato triplicado; contudo, com o aumento do diâmetro dos furos, a frequência de ressonância (f_r) aproximou-se da do anel circular de referência, indicando a influência dos furos na resposta do dispositivo. Na posição M, observou-se f_r mais alta que na posição F, também crescente com o aumento do diâmetro. A posição D apresentou as maiores frequências de ressonância, igualmente elevando-se conforme o diâmetro aumentava. Quanto à largura de banda (BW), a posição D obteve os maiores valores para as polarizações TE e TM; além disso, as estruturas com malhas EBG mostraram BW superiores às da FSS com substrato triplicado, embora menores que as do anel circular de referência.

Os resultados das respostas em frequência contendo os parâmetros de frequência de ressonância (f_r), coeficiente de transmissão (S_{21}) e largura de banda (BW) obtidos nas simulações realizadas e otimizadas no *software Ansoft HFSS®* e descritos anteriormente para a FSS anel circular de referência, anel com substrato triplicado e as demais configurações propostas incluindo as malhas/redes inspiradas em EBG e as suas respectivas variações na posição dos furos no interior do substrato estão contidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados simulados das respostas em frequência da FSS anel circular de referência, anel de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.

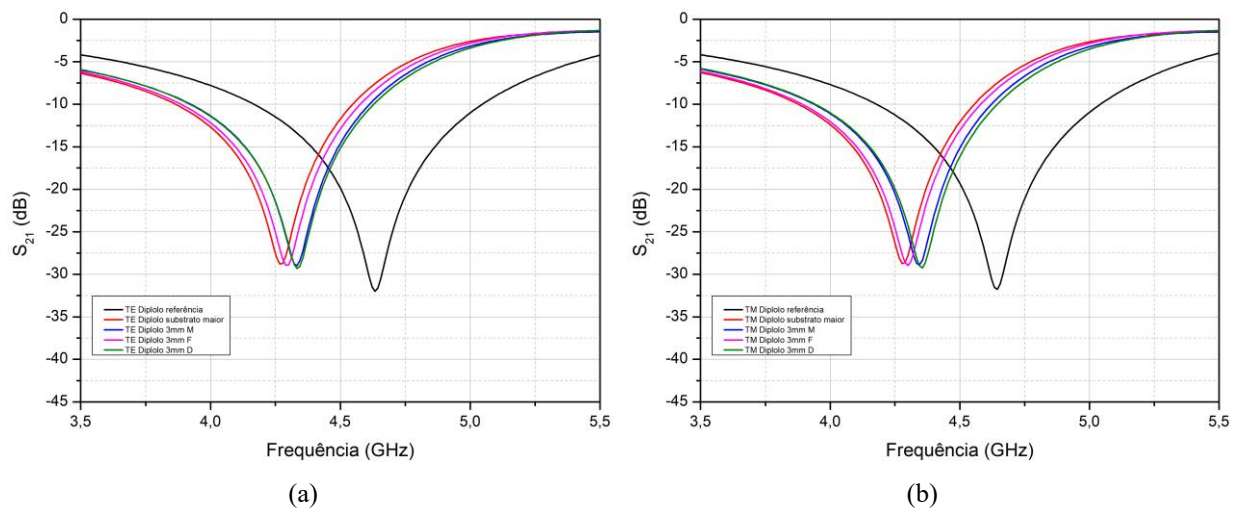
Estrutura	Frequência (GHz)		S_{21} (dB)		BW (GHz)	
	TE	TM	TE	TM	TE	TM
FSS anel circular referência	3,5444	3,5444	-38,1361	-38,0222	1,36	1,35
FSS substrato triplicado	3,2444	3,2222	-35,4922	-33,7591	1,10	1,04
FSS EBG 3mm – M	3,2667	3,2556	-35,7906	-35,7011	1,12	1,10
FSS EBG 3mm – F	3,2444	3,2444	-35,6918	-35,6696	1,11	1,10
FSS EBG 3mm – D	3,2667	3,2667	-35,7252	-35,8660	1,12	1,12
FSS EBG 4mm – M	3,2889	3,2778	-35,5731	-35,7010	1,10	1,09

FSS EBG 4mm – F	3,2556	3,2444	-35,7631	-35,8399	1,12	1,11
FSS EBG 4mm – D	3,3000	3,2889	-36,1118	-36,1520	1,15	1,14
FSS EBG 5mm – M	3,3111	3,3000	-35,9924	-35,8268	1,12	1,11
FSS EBG 5mm – F	3,2667	3,2667	-35,7972	-35,7910	1,11	1,11
FSS EBG 5mm – D	3,3333	3,3222	-36,3528	-36,4051	1,17	1,16

Fonte: Autoria própria, 2025.

As simulações também foram realizadas para as estruturas FSS dipolo cruzado. Na Figura 40 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS dipolo cruzado de referência, de substrato triplicado e das variações com relação a posição dos furos no substrato dielétrico para a malha/rede inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

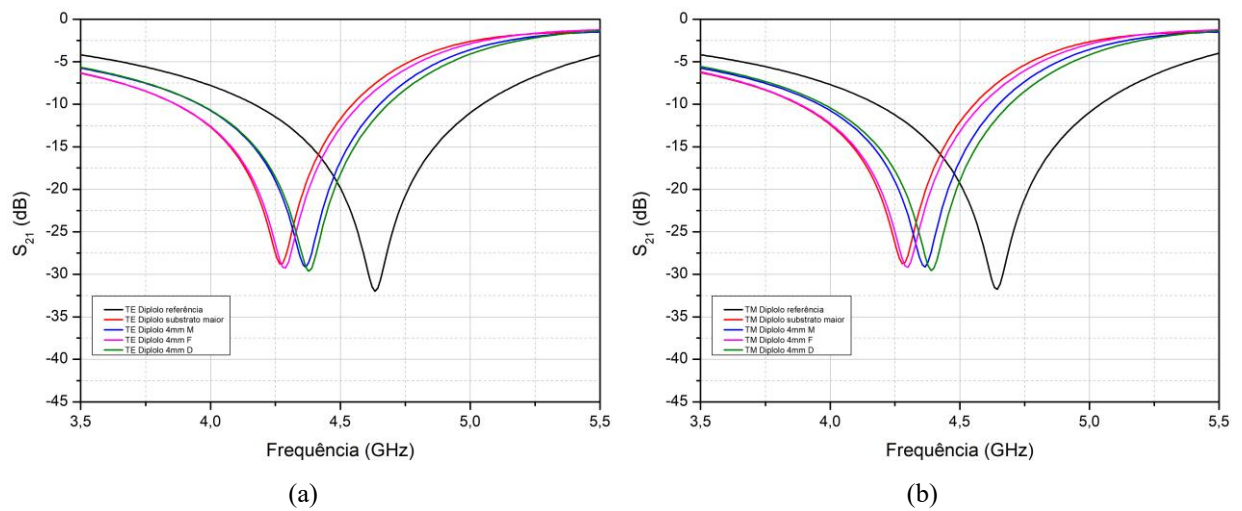
Figura 40 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) da FSS dipolo cruzado de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 3mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 41 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS dipolo cruzado de referência, semelhante ao realizado anteriormente. No entanto, a análise agora é para a malha/rede inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

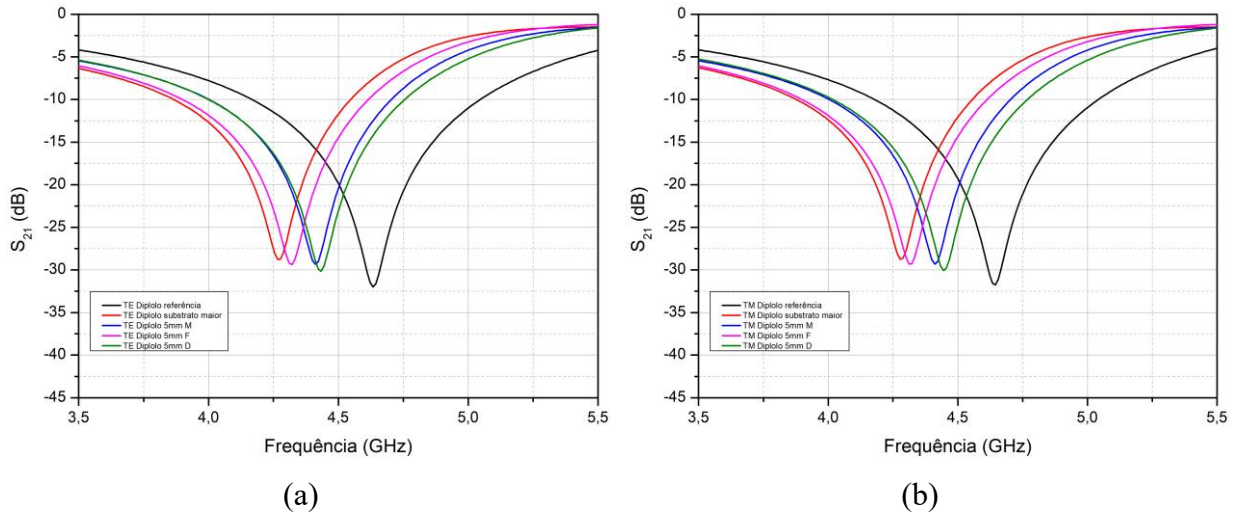
Figura 41 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) da FSS dipolo cruzado de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 4mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 42 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS anel circular de referência, semelhante ao realizado anteriormente. No entanto, a análise agora é para a malha/rede inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 42 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) da FSS dipolo cruzado de referência, substrato triplicado e as variações das posições dos furos da malha inspirada EBG de diâmetro 5mm para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Para a análise envolvendo a FSS dipolo cruzado foi possível perceber que de acordo com as simulações realizadas e nos gráficos apresentados houve uma variação na frequência de ressonância (f_r) quando se compara o projeto do dipolo cruzado como padrão de referência com as mudanças propostas tanto na altura do substrato como nas variações do posicionamento dos furos (e altura deles) das malhas/redes inspiradas em EBG adotadas, considerando incidência normal da onda eletromagnética para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal). O dipolo cruzado de referência apresentou um valor para o coeficiente de transmissão (S_{21}) de -31,9898 dB na frequência de ressonância (f_r) de 4,6333 GHz (frequência de projeto) na polarização TE, além de uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 0,88 GHz. Para a polarização TM, o dipolo cruzado de referência apresentou um valor de S_{21} de -31,7800 dB na frequência f_r de 4,6444 GHz (frequência de projeto), com uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 0,86 GHz.

As alterações na resposta em frequência apresentaram comportamento semelhante ao da espira quadrada e do anel circular, nas polarizações TE (vertical) e TM (horizontal). Com o aumento dos diâmetros das malhas EBG, a frequência de ressonância aproximou-se da do dipolo cruzado de referência, enquanto a largura de banda abaixo de -10 dB aumentou discretamente em relação à estrutura com substrato triplicado, permanecendo menor que a do projeto de referência. Em todos os gráficos observou-se o maior deslocamento na f_r para as estruturas FSS com substrato triplicado, sem a presença de EBG, onde para a polarização TE a f_r foi de 4,2667 GHz (S_{21} de -28,7803), representando uma diferença na frequência de 0,3666 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 7,9123%), e para a polarização

TM a f_r foi de 4,2778 GHz (S_{21} de -28,7330), representando uma diferença na frequência de 0,3666 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 7,8934%). Para essas estruturas os valores de BW sofreram uma diminuição (estreitamento) para valores abaixo de -10 dB, sendo de 0,68 GHz para ambas as polarizações TE e TM.

Observando as respostas em frequência das malhas/redes inspiradas em EBG, considerando o diâmetro do furo de 3mm, o comportamento foi semelhante ao dos projetos anteriores (espira quadrada e anel circular), onde a frequência de ressonância para a estrutura com os furos na posição F (final do substrato) foi de 4,3000 GHz tanto para a polarização TE quanto para a polarização TM, representando uma diferença na frequência de 0,3333 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 7,1936%) para polarização TE e de 0,3444 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 7,4154%), apresentando valores de S_{21} de -28,9098 dB e -28,9675 dB, respectivamente. Para as estruturas com os furos na posição M (meio do substrato) e posição D (dupla camada) foram observadas as f_r de 4,3333 GHz (S_{21} de -28,9880 dB) e 4,3333 GHz (S_{21} de -29,3336 dB), respectivamente, na polarização TE. Para a polarização TM foi obtida uma f_r de 4,3444 GHz (S_{21} de -28,9199 dB) para posição M e uma f_r de 4,3556 GHz (S_{21} de -29,2311 dB) para a posição D. Os deslocamentos relativos de frequência para a polarização TE foram de 6,4749% (diferença de 0,3000 GHz) para ambas as posições M e D. Para a polarização TM os deslocamentos foram de 6,4594% (diferença de 0,3000 GHz) para a posição M e de 6,2182% (diferença de 0,2888 GHz) para a posição D. Os valores de BW na polarização TE foram de 0,69 GHz, 0,69 GHz e 0,71 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM os valores foram de 0,68 GHz, 0,68 GHz e 0,70 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

Para o diâmetro de 4mm observou-se que a frequência de ressonância para a estrutura com os furos na posição F foi de f_r de 4,2889 GHz para a polarização TE e de 4,3000 GHz para a polarização TM, representando uma diferença na frequência de 0,3444 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 7,4331%) para TE e de 0,3444 GHz (deslocamento relativo de 7,4154%) para TM, apresentando os respectivos valores de coeficiente S_{21} de -29,2472 dB e de -29,1682 dB. Para as estruturas com os furos na posição M e posição D foram obtidas as f_r de 4,3667 GHz (S_{21} de -29,1608 dB) e 4,3778 GHz (S_{21} de -29,6403 dB), respectivamente, na polarização TE. Para a polarização TM foi obtida uma f_r de 4,3667 GHz (S_{21} de -29,1352 dB) para posição M e uma f_r de 4,3889 GHz (S_{21} de -29,5422 dB) para a posição D. Os deslocamentos relativos de frequência para a polarização TE foi de 5,7540% (diferença de 0,2666 GHz) para a posição M e de 5,5144% (diferença de 0,2555 GHz) para a

posição D. Para a polarização TM os deslocamentos foram de 5,9792% (diferença de 0,2777 GHz) para a posição M e de 5,5012% (diferença de 0,2555 GHz) para a posição D. Os valores de BW na polarização TE foram de 0,69 GHz, 0,71 GHz e 0,72 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM os valores foram de 0,69 GHz, 0,71 GHz e 0,72 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

Finalmente para o caso das estruturas com diâmetro de 5mm a frequência de ressonância para a estrutura com os furos na posição F foi de f_r de 4,3222 GHz para ambas as polarizações TE e TM, representando uma diferença na frequência de 0,3111 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 6,7144%) para a polarização TE e uma diferença na frequência de 0,3222 GHz do valor de referência (deslocamento relativo de 6,9374%) para a polarização TM, apresentando os respectivos valores de coeficiente S_{21} de -29,3692 dB e de -29,2994 dB. Para as estruturas com os furos na posição M e posição D foram obtidas as f_r de 4,4111 GHz (S_{21} de -29,3477 dB) e 4,4333 GHz (S_{21} de -30,1514 dB), respectivamente, na polarização TE. Para a polarização TM foi obtida uma f_r de 4,4111 GHz (S_{21} de -29,3214 dB) para posição M e uma f_r de 4,4444 GHz (S_{21} de -30,0620 dB) para a posição D. Os deslocamentos relativos de frequência para a polarização TE foram de 4,7957% (diferença de 0,2222 GHz) para a posição M e de 4,3166% (diferença de 0,2000 GHz) para posição D. Para a polarização TM os valores foram de 5,0232% (diferença de 0,2333 GHz) para a posição M e de 4,3063% (diferença de 0,2000 GHz) para a posição D. Os valores de BW na polarização TE foram de 0,70 GHz, 0,72 GHz e 0,76 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM os valores foram de 0,70 GHz, 0,71 GHz e 0,75 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

De modo geral, as simulações mostraram que o aumento da altura do substrato dielétrico na FSS com dipolo cruzado de referência reduziu a frequência de ressonância e estreitou a largura de banda na polarização TM. A introdução das malhas EBG nesse substrato triplicado provocou novas alterações na resposta em frequência, variando conforme a posição dos furos: no meio (M), no final (F) ou em dupla camada (D).

Para os furos na posição F, em ambas as polarizações, o comportamento foi semelhante ao da FSS com substrato triplicado; contudo, com o aumento do diâmetro dos furos, a frequência de ressonância (f_r) aproximou-se da do dispositivo de referência, evidenciando a influência dos furos na resposta. Na posição M, a f_r foi mais alta que na posição F e continuou aumentando com o diâmetro. A posição D apresentou as maiores frequências de ressonância, também crescentes conforme o diâmetro aumentava. Quanto à

largura de banda (BW), a posição D mostrou os maiores valores nas polarizações TE e TM; para a FSS dipolo cruzado, as estruturas com malhas EBG tiveram BW superiores às do substrato triplicado, porém menores que as do dipolo cruzado de referência.

Os resultados das respostas em frequência contendo os parâmetros de frequência de ressonância (f_r), coeficiente de transmissão (S_{21}) e largura de banda (BW) obtidos nas simulações realizadas e otimizadas no *software Ansoft HFSS®* e descritos anteriormente para a FSS dipolo cruzado de referência, dipolo com substrato triplicado e as demais configurações propostas incluindo as malhas/redes inspiradas em EBG e as suas respectivas variações na posição dos furos no interior do substrato estão contidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados simulados das respostas em frequência da FSS dipolo cruzado de referência, dipolo de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.

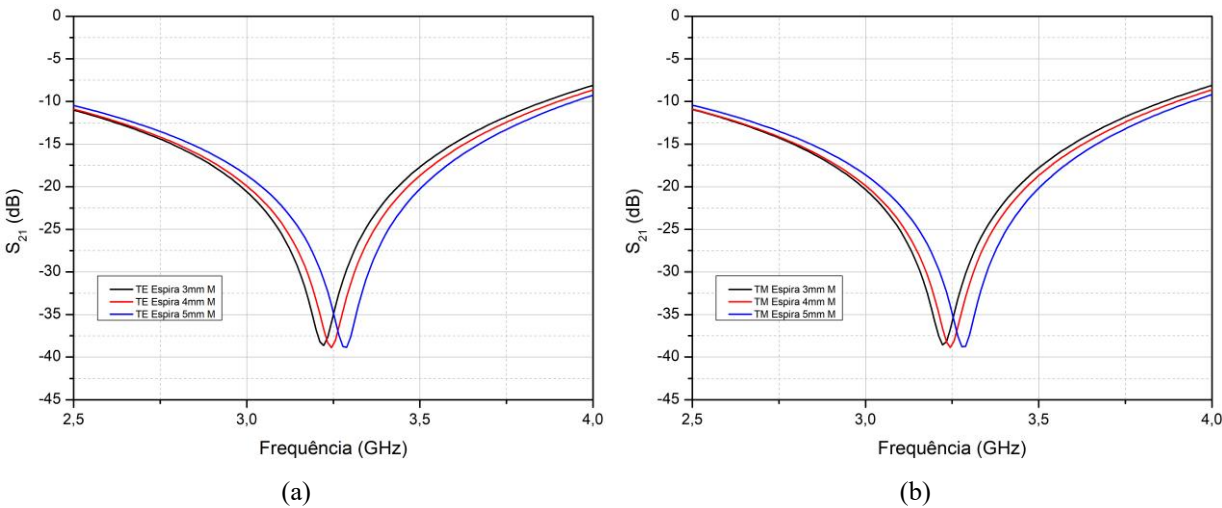
Estrutura	Frequência (GHz)		S_{21} (dB)		BW (GHz)	
	TE	TM	TE	TM	TE	TM
FSS dipolo cruzado referência	4,6333	4,6444	-31,9898	-31,7800	0,88	0,86
FSS substrato triplicado	4,2667	4,2778	-28,7803	-28,7330	0,68	0,68
FSS EBG 3mm – M	4,3333	4,3444	-28,9880	-28,9199	0,69	0,68
FSS EBG 3mm – F	4,3000	4,3000	-28,9098	-28,9675	0,69	0,68
FSS EBG 3mm – D	4,3333	4,3556	-29,3336	-29,2311	0,71	0,70
FSS EBG 4mm – M	4,3667	4,3667	-29,1608	-29,1352	0,69	0,69
FSS EBG 4mm – F	4,2889	4,3000	-29,2472	-29,1682	0,71	0,71
FSS EBG 4mm – D	4,3778	4,3889	-29,6403	-29,5422	0,72	0,72
FSS EBG 5mm – M	4,4111	4,4111	-29,3477	-29,3214	0,70	0,70

FSS EBG 5mm – F	4,3222	4,3222	-29,3692	-29,2994	0,72	0,71
FSS EBG 5mm – D	4,4333	4,4444	-30,1514	-30,0620	0,76	0,75

Fonte: Autoria própria, 2025.

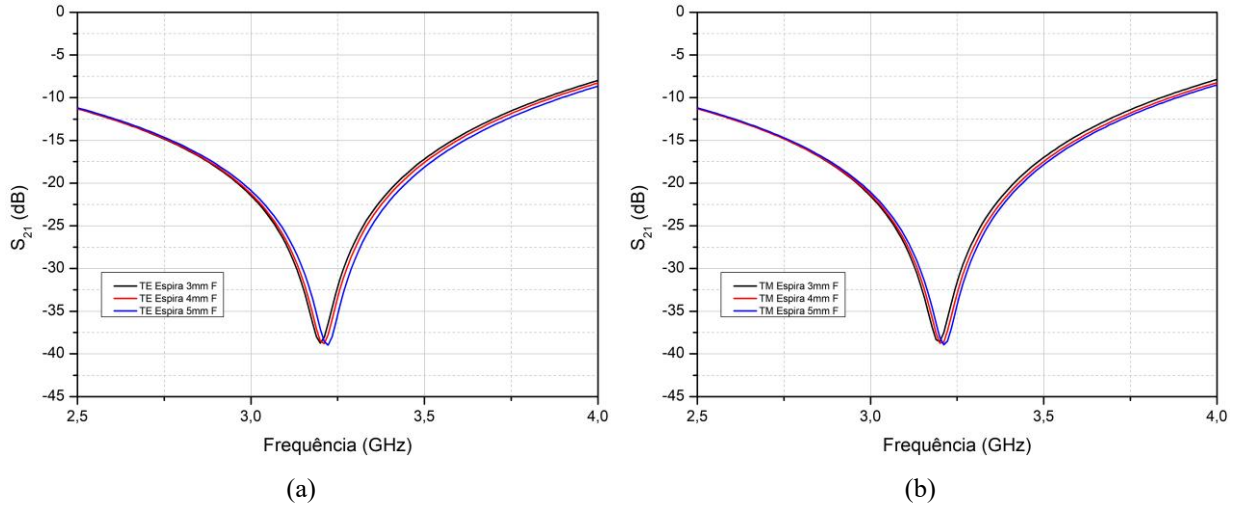
Para fins de avaliação da influência dos diâmetros dos furos presentes nas malhas/redes inspiradas em EBG, os gráficos a seguir irão mostrar um comparativo entre o comportamento da resposta em frequência das estruturas inspiradas em EBG fixando-se uma determinada posição dos furos e variando-se apenas os diâmetros. Na Figura 43 é possível observar e verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS espira quadrada com malha/rede 3x3 inspirada em EBG na posição do meio (M), com as três variações de diâmetro (3mm, 4mm e 5mm), em polarização TE (vertical) e em polarização TM (horizontal). Nas Figuras 44 e 45, podemos observar o comportamento da resposta para a posição final (F) e de dupla camada (D), respectivamente, tanto em polarização TE (vertical) quanto em polarização TM (horizontal).

Figura 43 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS espira quadrada com malha inspirada EBG na posição do meio (M) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



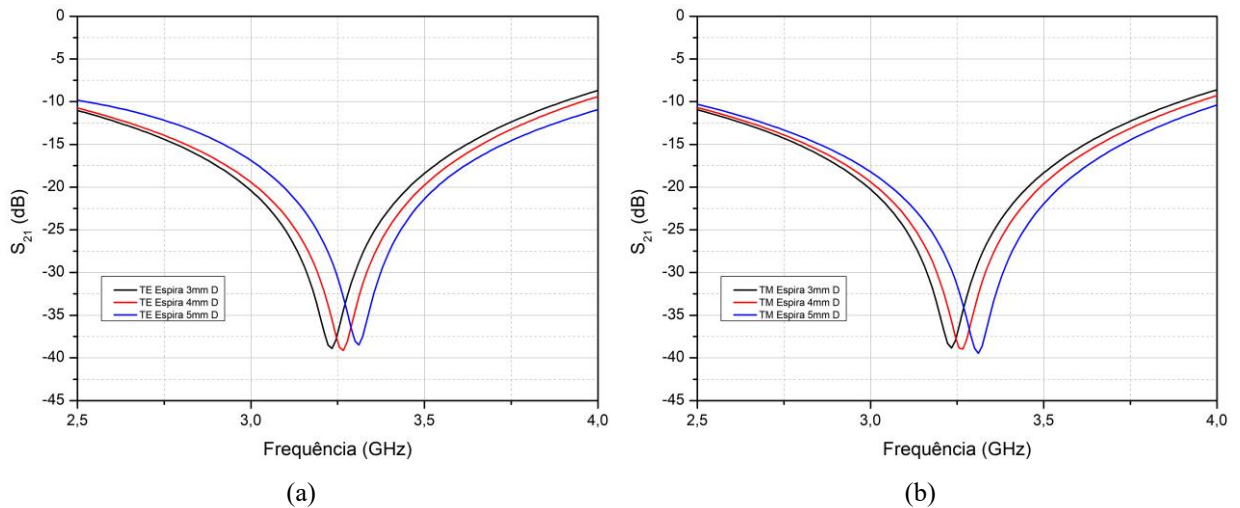
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 44 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS espira quadrada com malha inspirada EBG na posição final (F) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 45 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS espira quadrada com malha inspirada EBG de dupla camada (D) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



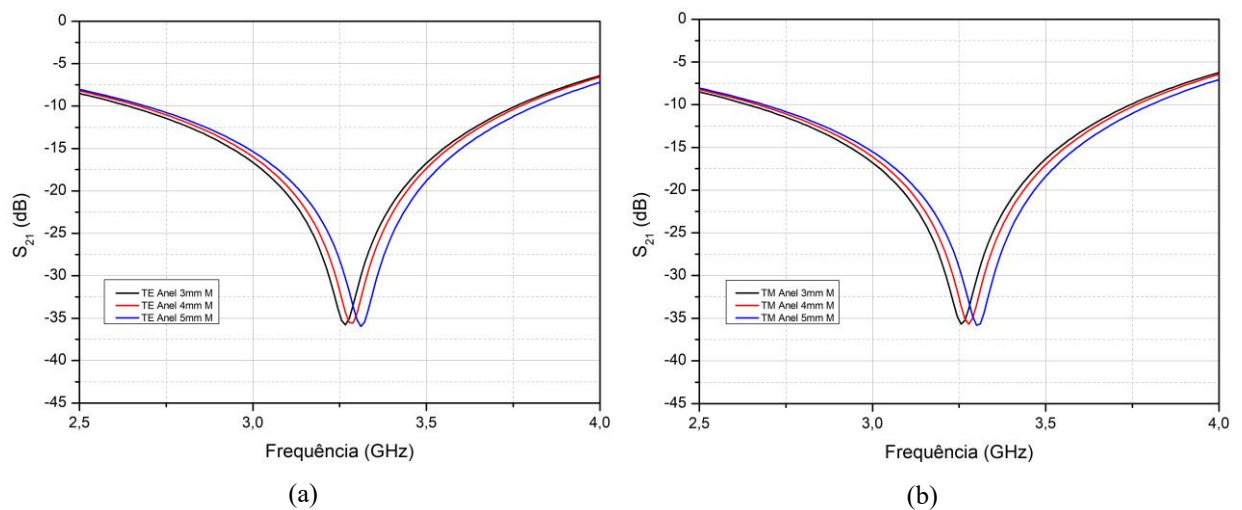
Fonte: Autoria própria, 2025.

Ao verificar os gráficos acima que dizem respeito ao comportamento da resposta em frequência em uma análise das malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG, variando-se o diâmetro dos furos e mantendo-se fixa a posição dos mesmos para a FSS espira quadrada, constata-se que à medida que os diâmetros dos furos vão aumentando a frequência de ressonância do dispositivo em questão também vai aumentando, tanto em polarização TE (vertical) como em polarização TM (horizontal), comportamento este verificado em todas as posições dos furos propostas, sendo que essa mudança é melhor observada na posição de dupla camada (D) com

uma influência maior no comportamento da resposta em frequência. A posição no meio (M) tem uma influência menor do que a de posição de dupla camada (D), mas ainda assim perceptível e maior do que a influência causada pela posição final (F), sendo esta última a posição de furos que apresentou a menor influência no comportamento da resposta em frequência da FSS espira quadrada em questão. Também foi verificado um pequeno aumento na largura de banda (BW) quando os diâmetros dos furos vão aumentando, onde os valores para BW e para o coeficiente de transmissão S_{21} observados para cada configuração proposta podem ser constatados na Tabela 2.

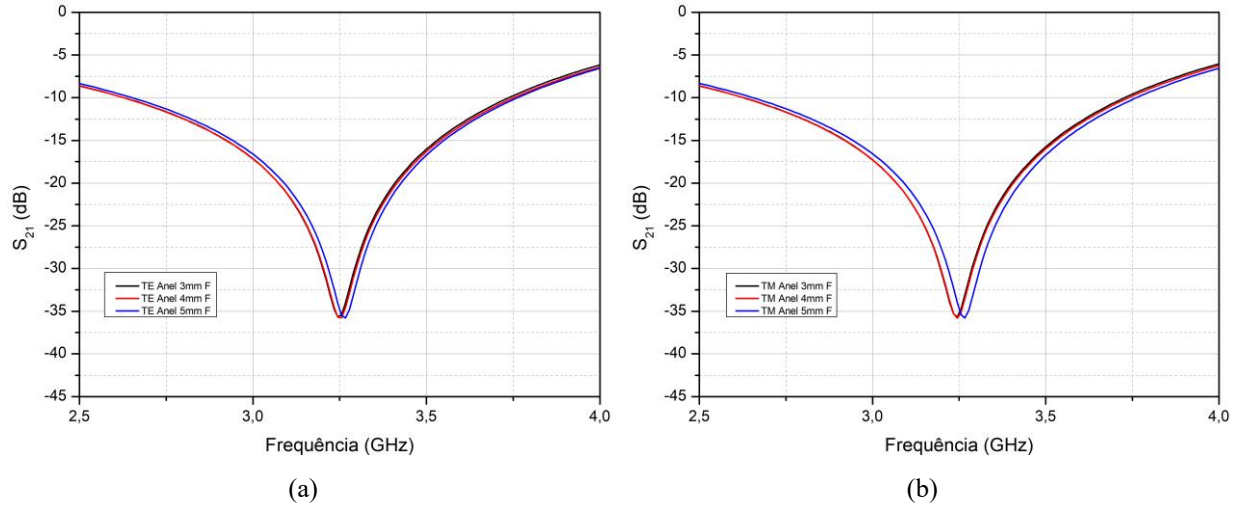
Seguindo a análise da influência dos diâmetros dos furos presentes nas malhas/redes inspiradas em EBG, os gráficos a seguir irão mostrar um comparativo entre o comportamento da resposta em frequência das estruturas inspiradas em EBG fixando-se uma determinada posição dos furos e variando-se apenas os diâmetros, agora considerando a FSS anel circular. Na Figura 46 é possível observar e verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS anel circular com malha/rede 3x3 inspirada em EBG na posição do meio (M), com as três variações de diâmetro (3mm, 4mm e 5mm), em polarização TE (vertical) e em polarização TM (horizontal). Nas Figuras 47 e 48, podemos observar o comportamento da resposta para a posição final (F) e de dupla camada (D), respectivamente, tanto em polarização TE (vertical) quanto em polarização TM (horizontal).

Figura 46 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS anel circular com malha inspirada EBG na posição do meio (M) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



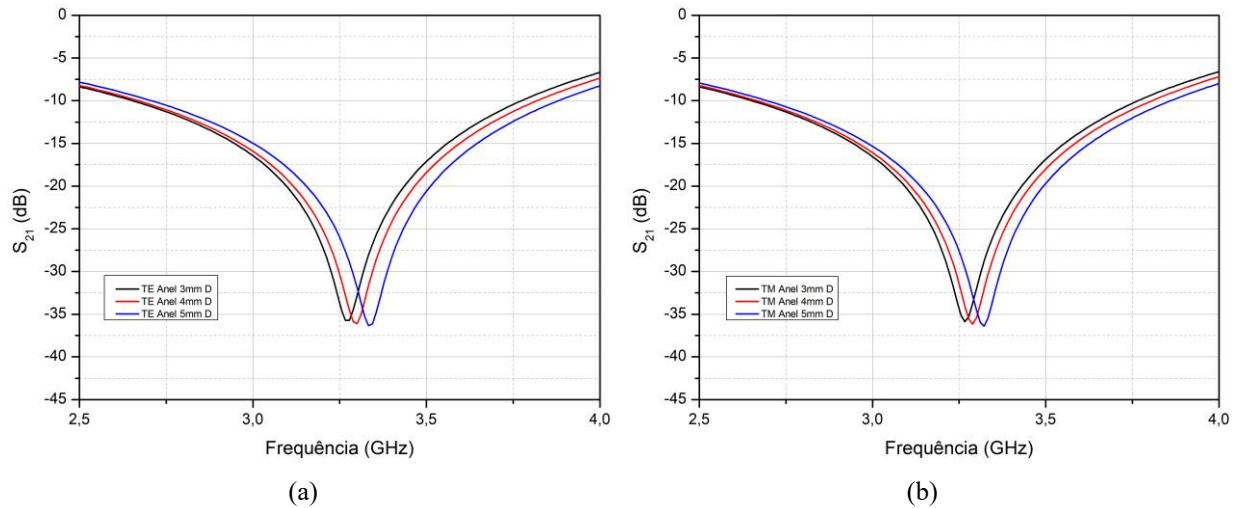
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 47 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS anel circular com malha inspirada EBG na posição final (F) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 48 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS anel circular com malha inspirada EBG de dupla camada (D) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



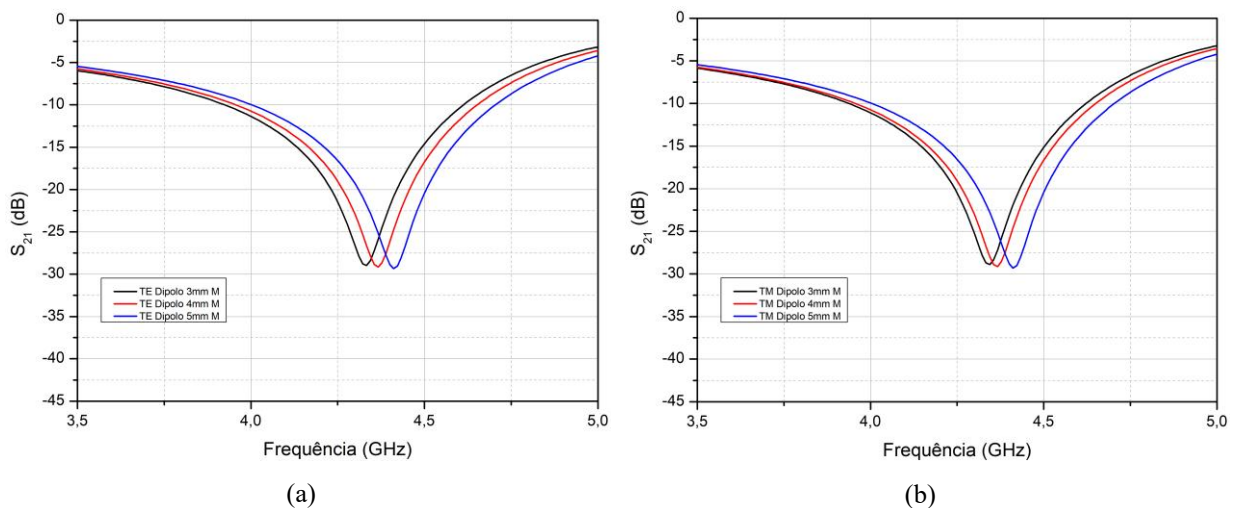
Fonte: Autoria própria, 2025.

Ao observar os gráficos acima que dizem respeito ao comportamento da resposta em frequência em uma análise das malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG, variando-se o diâmetro dos furos e mantendo-se fixa a posição dos mesmos para a FSS anel circular, constata-se um comportamento de resposta em frequência semelhante ao verificado para a FSS espira quadrada, onde à medida que os diâmetros dos furos vão aumentando a frequência de ressonância do dispositivo em questão também vai aumentando, tanto em polarização TE (vertical) como em polarização TM (horizontal), comportamento este verificado em todas as posições dos furos propostas, sendo que essa mudança continua sendo melhor observada na

posição de dupla camada (D) com uma influência maior no comportamento da resposta em frequência. A posição no meio (M) tem uma influência menor do que a de posição de dupla camada (D), mas ainda assim perceptível e maior do que a influência causada pela posição final (F), sendo esta última a posição de furos que apresentou a menor influência no comportamento da resposta em frequência da FSS anel circular em questão. Também foi verificado um pequeno aumento na largura de banda (BW) quando os diâmetros dos furos vão aumentando, onde os valores para BW e para o coeficiente de transmissão S_{21} observados para cada configuração proposta podem ser constatados na Tabela 3.

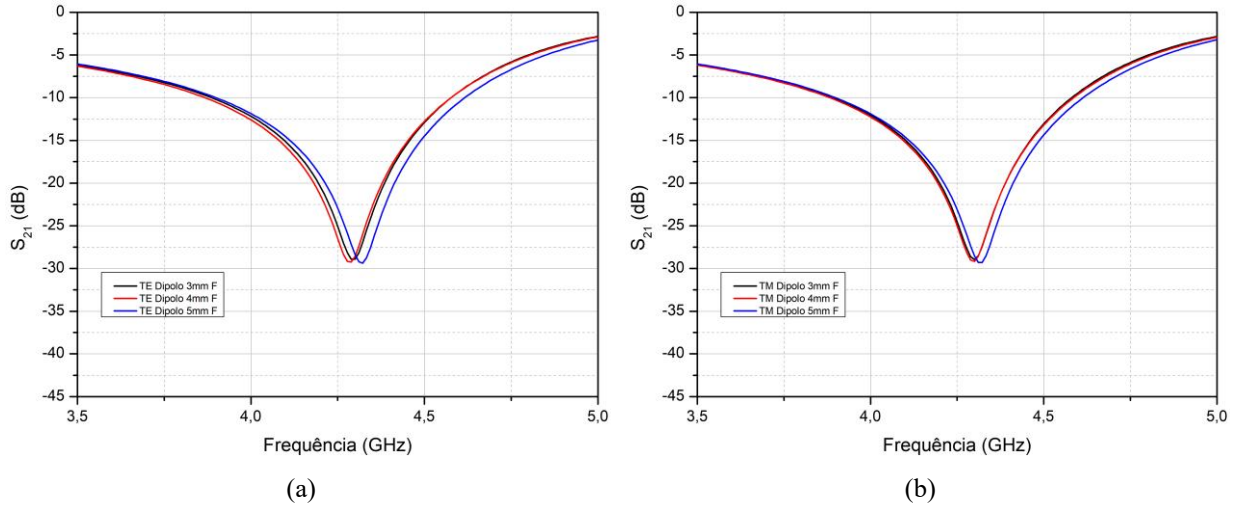
Para finalizar a análise da influência dos diâmetros dos furos presentes nas malhas/redes inspiradas em EBG, os gráficos a seguir irão mostrar um comparativo entre o comportamento da resposta em frequência das estruturas inspiradas em EBG fixando-se uma determinada posição dos furos e variando-se apenas os diâmetros, agora considerando a FSS dipolo cruzado. Na Figura 49 é possível observar e verificar o comportamento da resposta em frequência da FSS dipolo cruzado com malha/rede 3x3 inspirada em EBG na posição do meio (M), com as três variações de diâmetro (3mm, 4mm e 5mm), em polarização TE (vertical) e em polarização TM (horizontal). Nas Figuras 50 e 51, podemos observar o comportamento da resposta para a posição final (F) e de dupla camada (D), respectivamente, tanto em polarização TE (vertical) quanto em polarização TM (horizontal).

Figura 49 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS dipolo cruzado com malha inspirada EBG na posição do meio (M) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



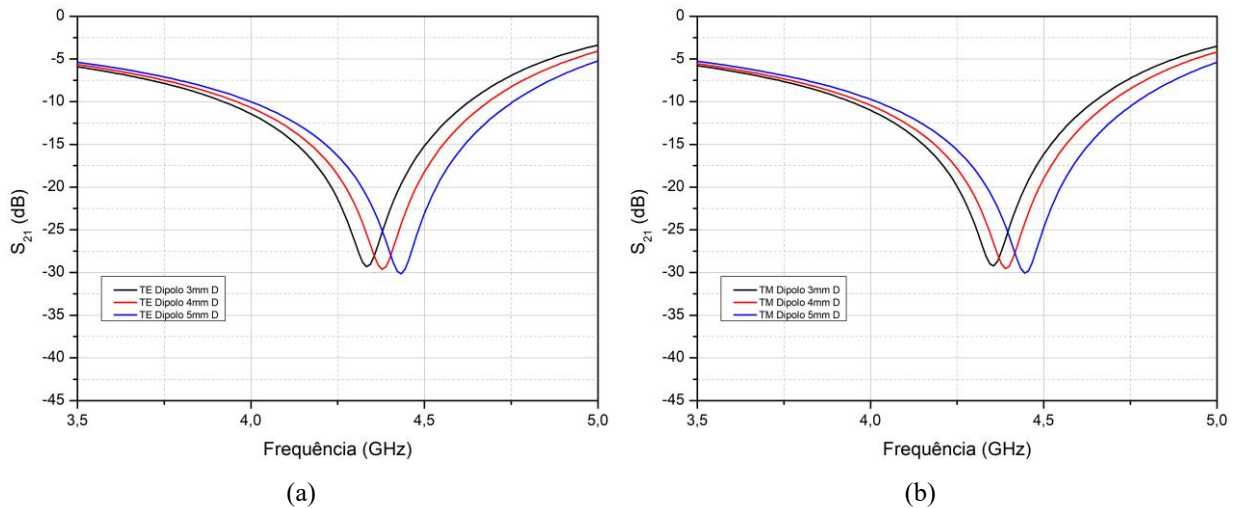
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 50 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS dipolo cruzado com malha inspirada EBG na posição final (F) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 51 – Comparativo dos coeficientes de transmissão (S_{21}) da FSS dipolo cruzado com malha inspirada EBG de dupla camada (D) dos furos variando-se o diâmetro destes para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

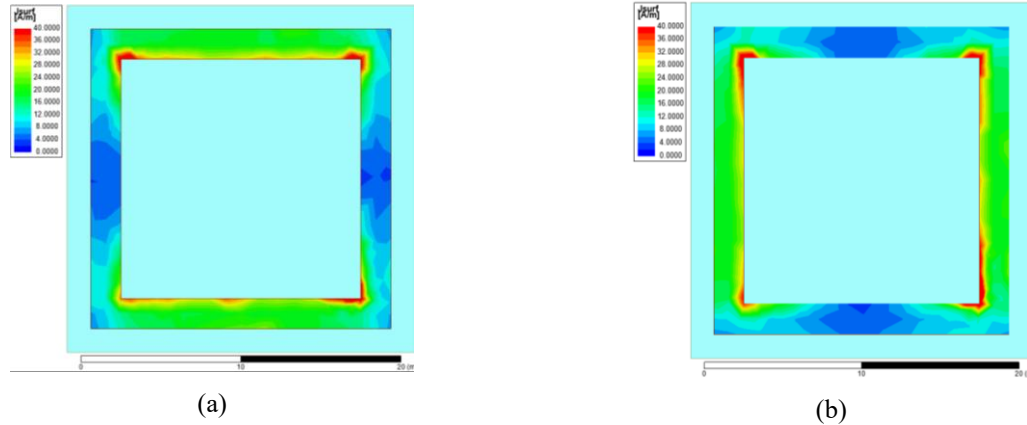
Visualizando e analisando os gráficos acima que dizem respeito ao comportamento da resposta em frequência em uma análise das malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG, variando-se o diâmetro dos furos e mantendo-se fixa a posição dos mesmos para a FSS dipolo cruzado, constata-se um comportamento de resposta em frequência semelhante ao verificado tanto para a FSS espira quadrada como para o anel circular, onde à medida que os diâmetros dos furos vão aumentando a frequência de ressonância do dispositivo em questão também vai aumentando, tanto em polarização TE (vertical) como em polarização TM (horizontal),

comportamento este verificado em todas as posições dos furos propostas, sendo que essa mudança continua sendo melhor observada na posição de dupla camada (D) com uma influência maior no comportamento da resposta em frequência. A posição no meio (M) tem uma influência menor do que a de posição de dupla camada (D), mas ainda assim perceptível e maior do que a influência causada pela posição final (F), sendo esta última a posição de furos que apresentou a menor influência no comportamento da resposta em frequência da FSS dipolo cruzado em questão. Também foi verificado um pequeno aumento na largura de banda (BW) quando os diâmetros dos furos vão aumentando, onde os valores para BW e para o coeficiente de transmissão S_{21} observados para cada configuração proposta podem ser constatados na Tabela 4.

Foram realizados estudos de simulação envolvendo a análise da densidade superficial de corrente elétrica (J) das diversas estruturas propostas desde as FSS adotadas como padrão de referência, destas estruturas contendo substrato triplicado e com a presença de malhas/redes inspiradas em EBG e suas respectivas variações quanto aos diâmetros dos furos e a posição destes ao longo do substrato dielétrico, visando obter o modo como as correntes elétricas se distribuem através dos componentes metálicos das estruturas. As simulações ocorreram para a incidência normal da onda eletromagnética nas polarizações TE (vertical) e TM (horizontal).

A Figura 52 mostra o comportamento da densidade superficial de corrente J no elemento condutor da FSS espira quadrada de referência para ambas as polarizações, onde é possível perceber a maneira pelo qual a corrente se distribui na superfície metálica da FSS, sendo que se concentra nas bordas superior, inferior e nos cantos internos da espira metálica para a polarização TE (vertical) e nas bordas laterais esquerda, direita e nos cantos internos da espira metálica para a polarização TM (horizontal). Todos os resultados e gráficos gerados pelas simulações do comportamento de J possuem escala em A/m (ampère por metro) e utilizam uma faixa de cores associadas aos valores de J para indicar onde está concentrada a maior densidade de corrente elétrica ao longo dos elementos metálicos, indo de azul escuro (menor densidade de corrente) até vermelho escuro (maior densidade de corrente). Em todos os gráficos foram adotados limites padrão (normalização) indo de 0 até 40 A/m, a fim de tornar possível a diferença real de comportamento entre as diversas estruturas FSS propostas e suas respectivas variações.

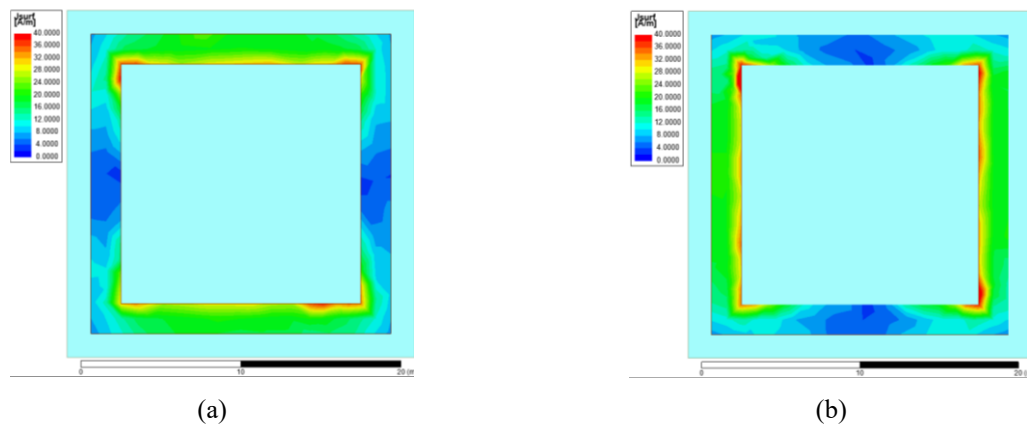
Figura 52 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS espira quadrada de referência, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 53 é possível verificar o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS espira quadrada de referência com substrato triplicado, para ambas as polarizações, onde se verificou como as correntes elétricas se comportam na superfície metálica da FSS e, assim como no caso da FSS espira quadrada de referência, tais correntes se concentraram nas bordas superior, inferior e nos cantos internos da espira metálica para a polarização TE (vertical) e nas bordas laterais esquerda, direita e nos cantos internos da espira metálica para a polarização TM (horizontal).

Figura 53 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS espira quadrada com substrato triplicado, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.

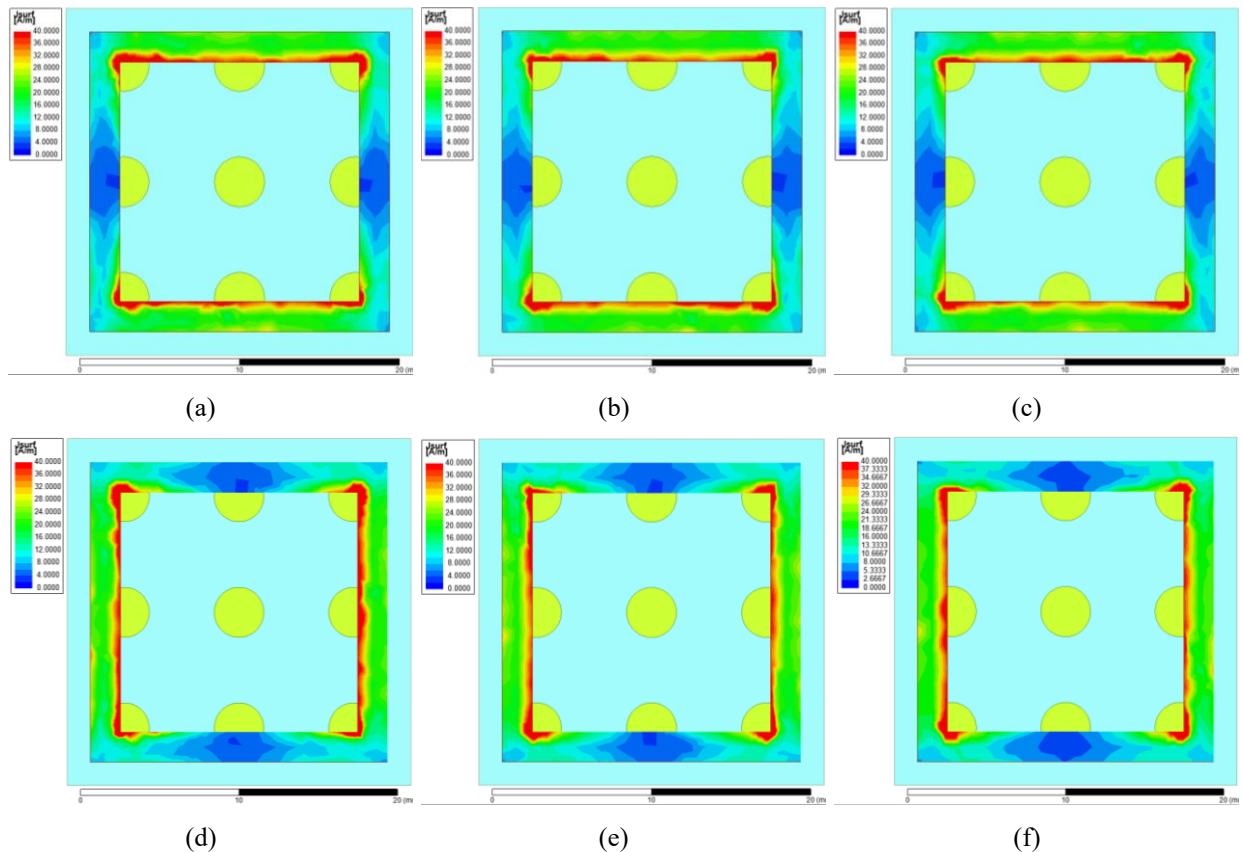


Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 54 é mostrado o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS espira quadrada com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com o diâmetro dos furos de 3mm e suas respectivas posições dos furos, a saber:

posição do meio (M), posição final (F) e dupla camada (D); para ambas as polarizações, onde se verificou como as correntes elétricas se comportam na superfície metálica da FSS. Com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com diâmetro de 3mm, observou-se uma maior densidade de corrente em todas as bordas e cantos internos comparando com os resultados observados na FSS padrão de referência e na FSS de substrato triplicado. Em polarização TE (vertical) as bordas superior e inferior, bem como os cantos internos apresentaram uma alta densidade de corrente elétrica e em polarização TM (horizontal) as bordas laterais esquerda, direita e os cantos internos apresentaram maiores valores da densidade de corrente elétrica.

Figura 54 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS espira quadrada com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.

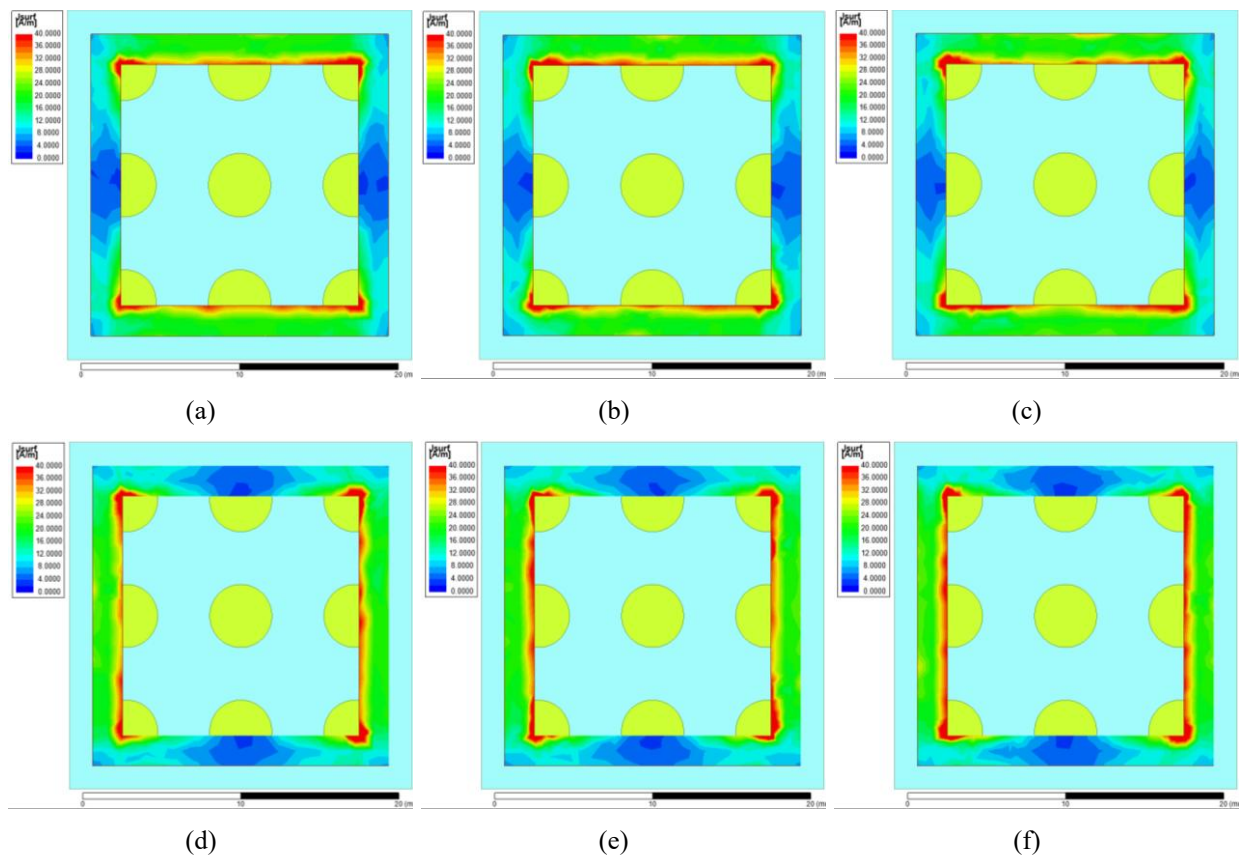


Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 55 verifica-se o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS espira quadrada com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com o diâmetro dos furos de 4mm e suas respectivas posições dos furos, a saber: posição do meio (M), posição final (F) e dupla camada (D); para ambas as polarizações, onde

se verificou como as correntes elétricas se comportam na superfície metálica da FSS. Assim como no caso das malhas/redes inspiradas em EBG com diâmetro de 3mm, observou-se uma maior densidade de corrente em todas as bordas e cantos internos comparando com os resultados observados na FSS padrão de referência e na FSS de substrato triplicado, evidenciando mais uma vez a influência que a presença dos furos causa na distribuição das correntes nos elementos metálicos. Novamente em polarização TE (vertical) as bordas superior e inferior, bem como os cantos internos apresentaram uma alta densidade de corrente elétrica e em polarização TM (horizontal) as bordas laterais esquerda, direita e os cantos internos apresentaram maiores valores da densidade de corrente elétrica.

Figura 55 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS espira quadrada com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.

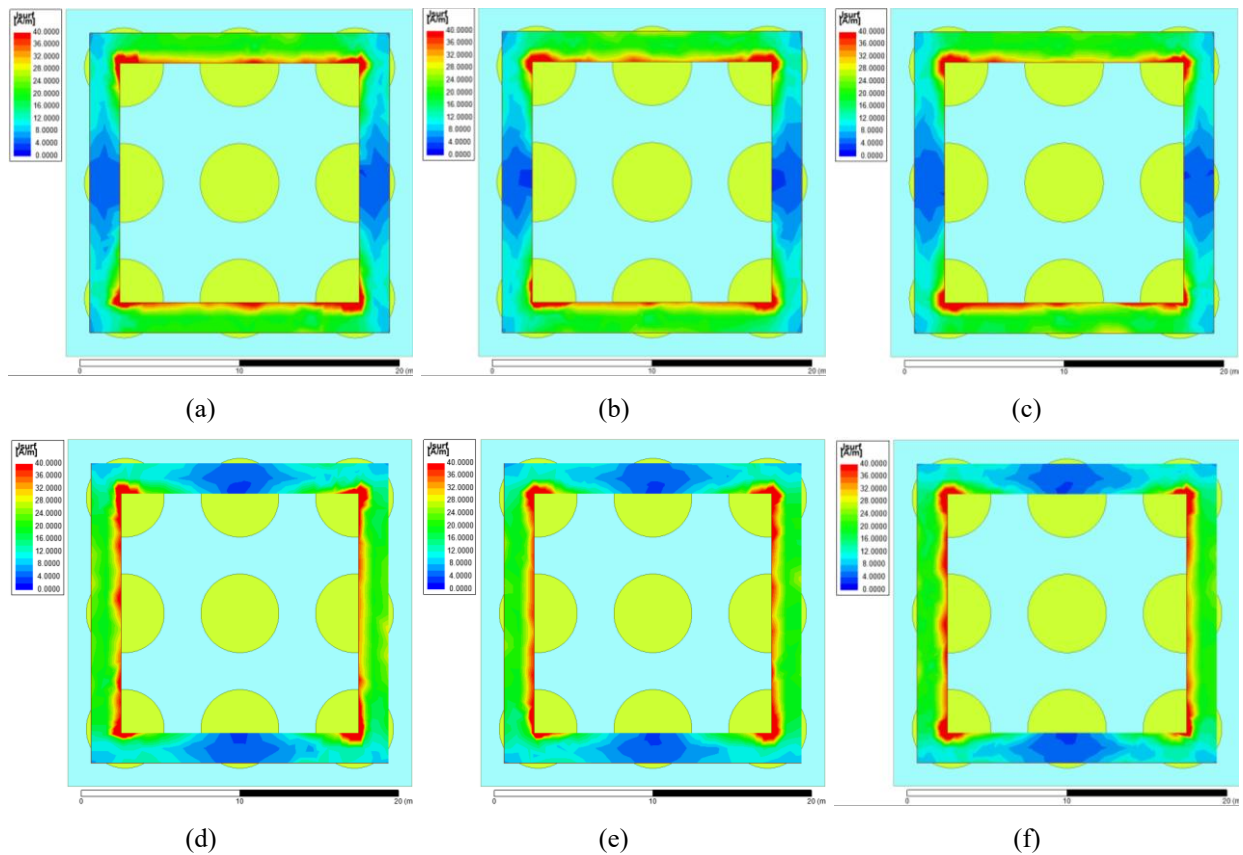


Fonte: Autoria própria, 2025.

Para finalizar a análise envolvendo a FSS espira quadrada, na Figura 56 é mostrado o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS espira quadrada com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com o diâmetro dos furos de

5mm e suas respectivas posições dos furos, a saber: posição do meio (M), posição final (F) e dupla camada (D); para ambas as polarizações, onde se verificou como as correntes elétricas se comportam na superfície metálica da FSS. Mais uma vez, assim como aconteceu para o caso dos furos com diâmetro de 3mm e de 4mm, pelo fato da presença das malhas/redes inspiradas em EBG agora com diâmetro de 5mm, observou-se uma maior densidade de corrente em todas as bordas e cantos internos comparando com os resultados observados na FSS padrão de referência e na FSS de substrato triplicado, expondo novamente a influência que a presença dos furos causa na distribuição das correntes nos elementos metálicos. Para a polarização TE (vertical) as bordas superior e inferior, bem como os cantos internos apresentaram uma alta densidade de corrente elétrica e em polarização TM (horizontal) as bordas laterais esquerda, direita e os cantos internos apresentaram maiores valores da densidade de corrente elétrica.

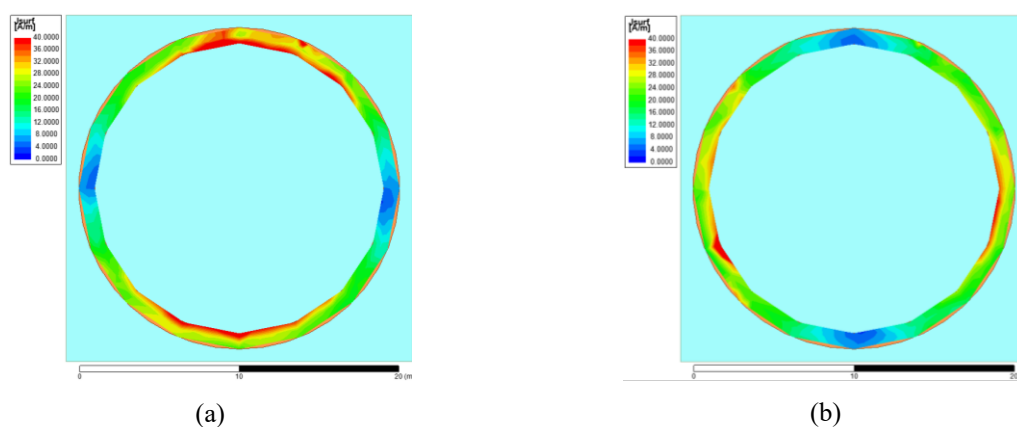
Figura 56 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS espira quadrada com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Após finalizada as simulações para se verificar o comportamento da densidade de corrente elétrica envolvendo a FSS espira quadrada e as suas variações propostas, procedeu-se com as simulações visando analisar o comportamento de J para a FSS anel circular e suas respectivas variações definidas. Seguindo o mesmo procedimento adotado anteriormente para a FSS espira quadrada, a Figura 57 permite avaliar o comportamento da densidade superficial de corrente J no elemento condutor da FSS anel circular de referência para ambas as polarizações, onde é mostrado a maneira pelo qual a corrente se distribui na superfície metálica da FSS. Assim como na FSS espira quadrada de referência, as correntes elétricas na FSS anel circular de referência se concentraram na parte superior, inferior e nas faces internas do anel metálico para a polarização TE (vertical) e nas partes laterais esquerda, direita e nas faces internas do anel metálico para a polarização TM (horizontal). Novamente, todos os resultados e gráficos gerados pelas simulações do comportamento de J possuem escala em A/m (ampère por metro) e utilizam uma faixa de cores associadas aos valores de J para indicar onde está concentrada a maior densidade de corrente elétrica ao longo dos elementos metálicos, indo de azul escuro (menor densidade de corrente) até vermelho escuro (maior densidade de corrente). Os limites padrão (normalização) adotados também vão de 0 até 40 A/m, a fim de se manter o padrão das análises e tornar possível a percepção da diferença real de comportamento entre as diversas estruturas FSS propostas e suas respectivas variações.

Figura 57 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS anel circular de referência, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.

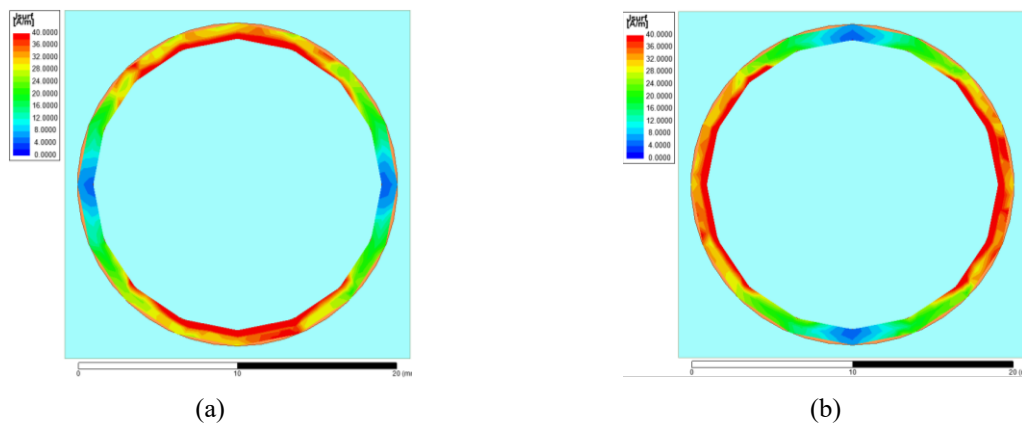


Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 58 é observado o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS anel circular de referência com substrato triplicado, para ambas as polarizações, onde se verificou como as correntes elétricas se comportam na superfície

metálica da FSS e, assim como no caso da FSS anel circular de referência, tais correntes se concentraram nas partes superior, inferior e nas faces internas do anel metálico para a polarização TE (vertical) e nas partes laterais esquerda, direita e nas faces internas do anel metálico para a polarização TM (horizontal), sendo que para essa configuração o comportamento da densidade de corrente J foi mais intenso nas regiões supramencionadas.

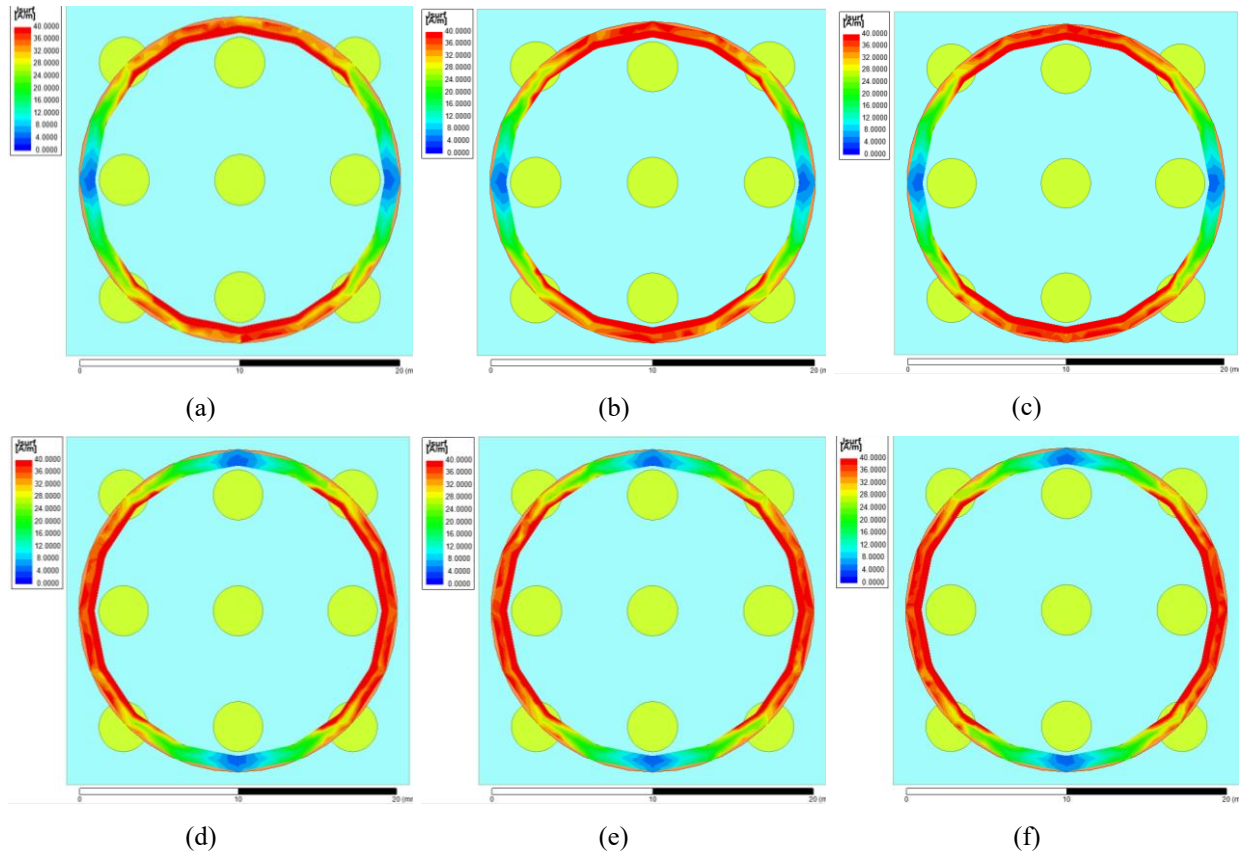
Figura 58 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS anel circular com substrato triplicado, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Seguindo o mesmo procedimento adotado na análise da FSS espira quadrada com a inserção das malhas/redes inspiradas em EBG, na Figura 59 é verificado o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS anel circular com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com o diâmetro dos furos de 3mm e suas respectivas posições dos furos, a saber: posição do meio (M), posição final (F) e dupla camada (D); para ambas as polarizações, onde se verificou como as correntes elétricas se comportam na superfície metálica da FSS. Com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com diâmetro de 3mm, observou-se uma maior densidade de corrente em todas as partes e faces internas comparando com os resultados observados na FSS padrão de referência e na FSS de substrato triplicado. Em polarização TE (vertical) as partes superior e inferior, bem como as faces internas apresentaram uma alta densidade de corrente elétrica e em polarização TM (horizontal) as partes laterais esquerda, direita e as faces internas apresentaram maiores valores da densidade de corrente elétrica.

Figura 59 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS anel circular com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.

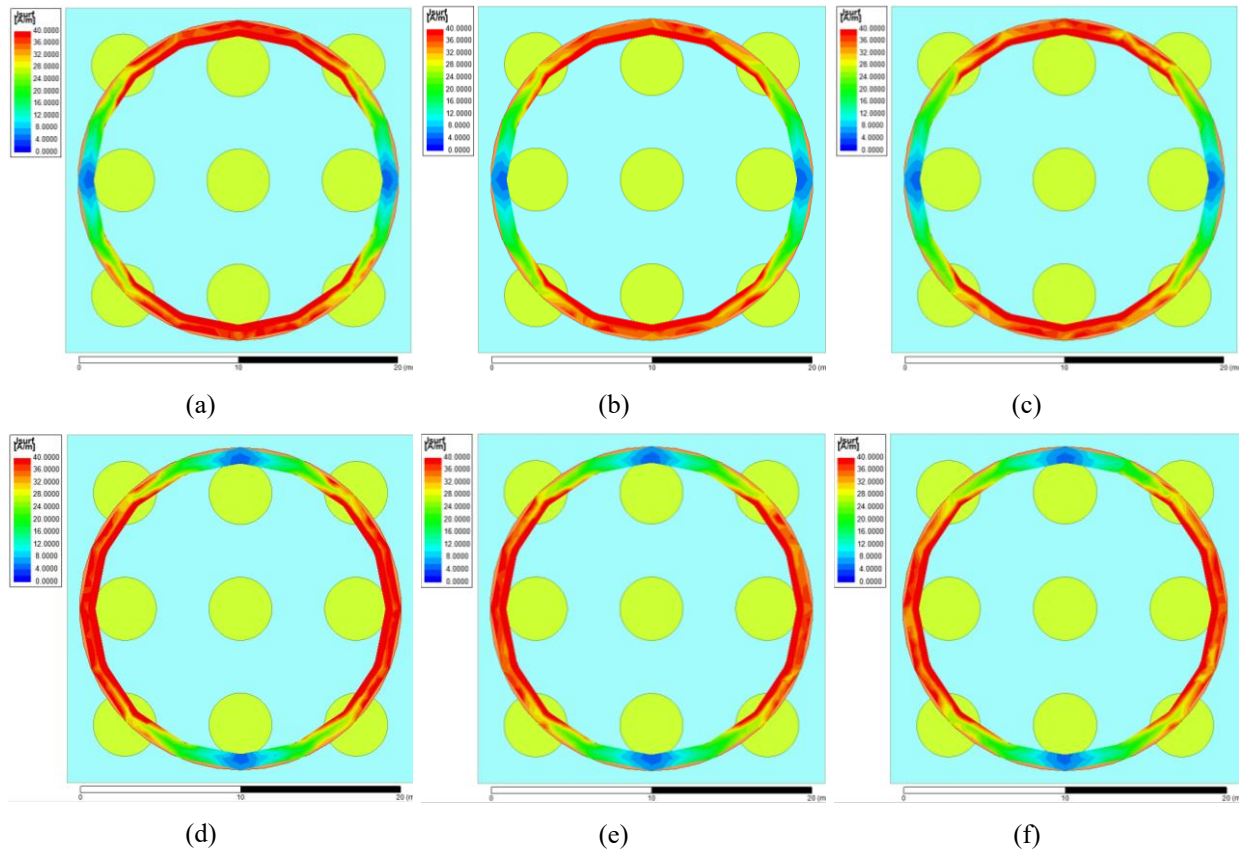


Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 60 verifica-se o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS anel circular com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com o diâmetro dos furos de 4mm e suas respectivas posições dos furos, a saber: posição do meio (M), posição final (F) e dupla camada (D); para ambas as polarizações, onde se percebeu como as correntes elétricas se comportam na superfície metálica da FSS. Semelhantemente ao caso das malhas/redes inspiradas em EBG com diâmetro de 3mm, observou-se uma maior densidade superficial de corrente elétrica onde a concentração das correntes se mostraram mais intensas em todas as partes e faces internas comparando com os resultados observados na FSS padrão de referência e na FSS de substrato triplicado, mostrando mais uma vez a influência que a presença dos furos causa na distribuição das correntes nos elementos metálicos. Novamente em polarização TE (vertical) as partes superior e inferior, bem como as faces internas apresentaram uma alta densidade de corrente elétrica e em polarização TM

(horizontal) as partes laterais esquerda, direita e as faces internas apresentaram maiores valores da densidade de corrente elétrica.

Figura 60 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS anel circular com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.

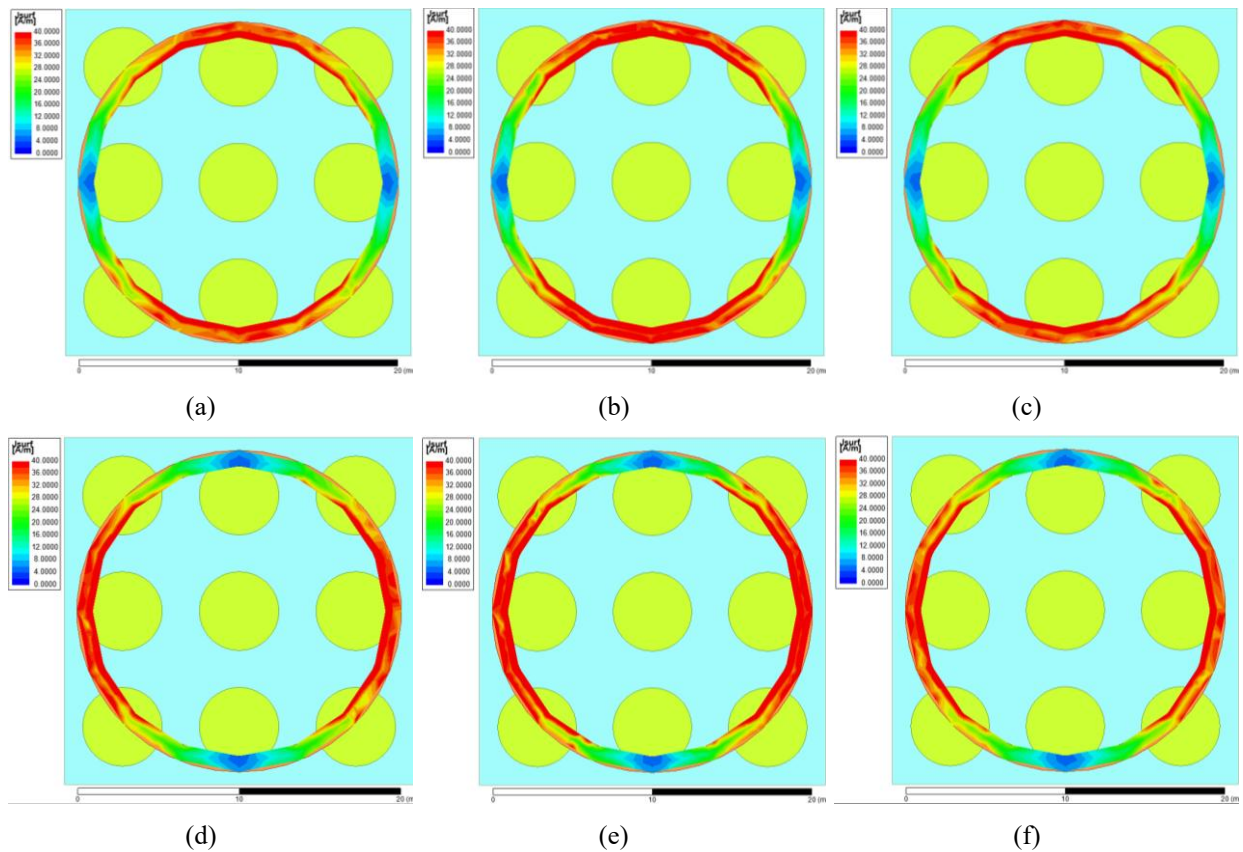


Fonte: Autoria própria, 2025.

Para concluir toda a análise envolvendo a FSS anel circular, na Figura 61 é mostrado o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS anel circular com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com o diâmetro dos furos de 5mm e suas respectivas posições dos furos, a saber: posição do meio (M), posição final (F) e dupla camada (D); para ambas as polarizações, onde se observou o comportamento das correntes elétricas ao longo da superfície metálica da FSS. Mais uma vez, assim como aconteceu para o caso dos furos com diâmetro de 3mm e de 4mm, pelo fato da presença das malhas/redes inspiradas em EBG agora com diâmetro de 5mm, observou-se uma maior densidade de corrente em todas as partes e faces internas comparando com os resultados observados na FSS padrão de referência e na FSS de substrato triplicado, expondo novamente

a influência que a presença dos furos causa na distribuição das correntes nos elementos metálicos. Para a polarização TE (vertical) as partes superior e inferior, bem como as faces internas apresentaram uma alta densidade de corrente elétrica e em polarização TM (horizontal) as partes laterais esquerda, direita e as faces internas apresentaram maiores valores da densidade superficial de corrente elétrica.

Figura 61 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS anel circular com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.

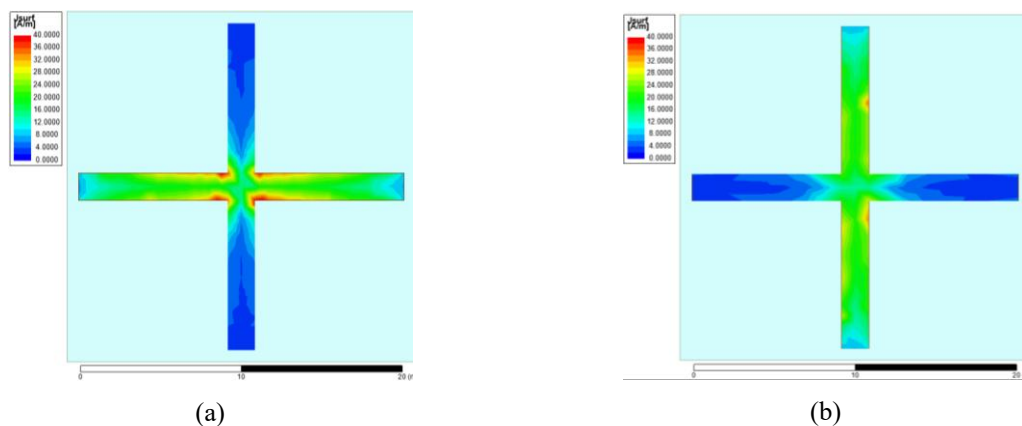


Fonte: Autoria própria, 2025.

Após a conclusão das simulações envolvendo a FSS anel circular e as suas variações propostas, ficou restando apenas se observar o comportamento da densidade superficial de corrente elétrica envolvendo a FSS dipolo cruzado. Assim como anteriormente, seguiu-se o mesmo procedimento adotado para as estruturas FSS espira quadrada e anel circular, onde na Figura 62 é possível verificar o comportamento da densidade superficial de corrente J no elemento condutor da FSS dipolo cruzado de referência para ambas as polarizações, onde é mostrado a maneira pelo qual a corrente se distribui na superfície metálica da FSS. Fica evidenciado, para o caso da FSS dipolo cruzado, que as correntes elétricas se concentraram na

fita metálica que se encontra na posição horizontal com uma presença mais intensa no centro dessa fita e na região dos cantos de junção entre a fita metálica horizontal e a vertical para o caso da polarização TE (vertical). Para o caso da polarização TM (horizontal), observou-se uma maior concentração de corrente na fita metálica que se encontra na posição vertical com uma presença mais intensa no centro dessa fita e também nos cantos de junção entre as duas fitas. Ressalta-se que todos os resultados e gráficos gerados pelas simulações do comportamento de J possuem escala em A/m (ampère por metro) e utilizam uma faixa de cores associadas aos valores de J para indicar onde está concentrada a maior densidade de corrente elétrica ao longo dos elementos metálicos, indo de azul escuro (menor densidade de corrente) até vermelho escuro (maior densidade de corrente). Os limites padrão (normalização) adotados também vão de 0 até 40 A/m, a fim de se manter o padrão das análises e tornar possível a percepção da diferença real de comportamento entre as diversas estruturas FSS propostas e suas respectivas variações.

Figura 62 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS dipolo cruzado de referência, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.

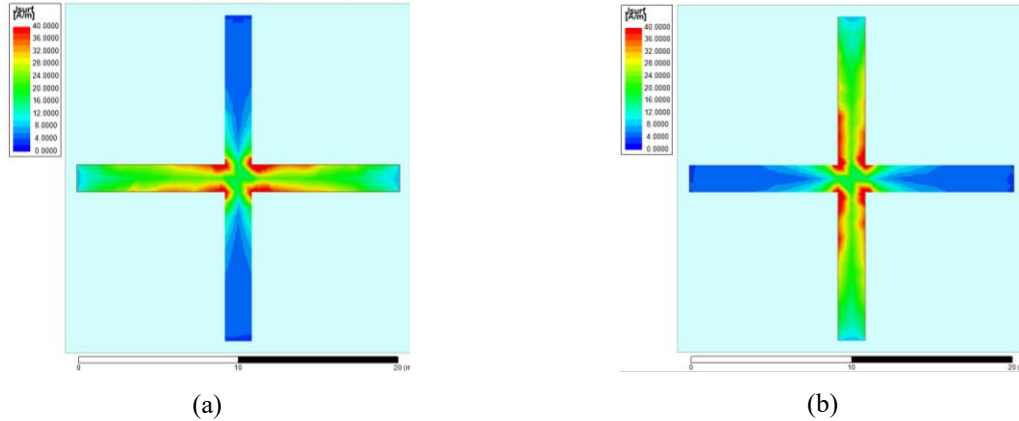


Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 63 é observado o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS dipolo cruzado de referência com substrato triplicado, para ambas as polarizações, onde se verificou como as correntes elétricas se comportam na superfície metálica da FSS e, assim como no caso da FSS analisadas anteriormente, ocorreu um aumento na concentração das correntes elétricas, sendo mais intenso no centro da fita metálica que está na posição horizontal com uma concentração mais acentuada nos cantos de junção entre as duas fitas metálicas para o caso da polarização TE (vertical), e uma concentração no centro da

fita metálica que está na posição vertical com uma concentração mais acentuada nos cantos de junção entre as duas fitas metálicas para o caso da polarização TM (horizontal).

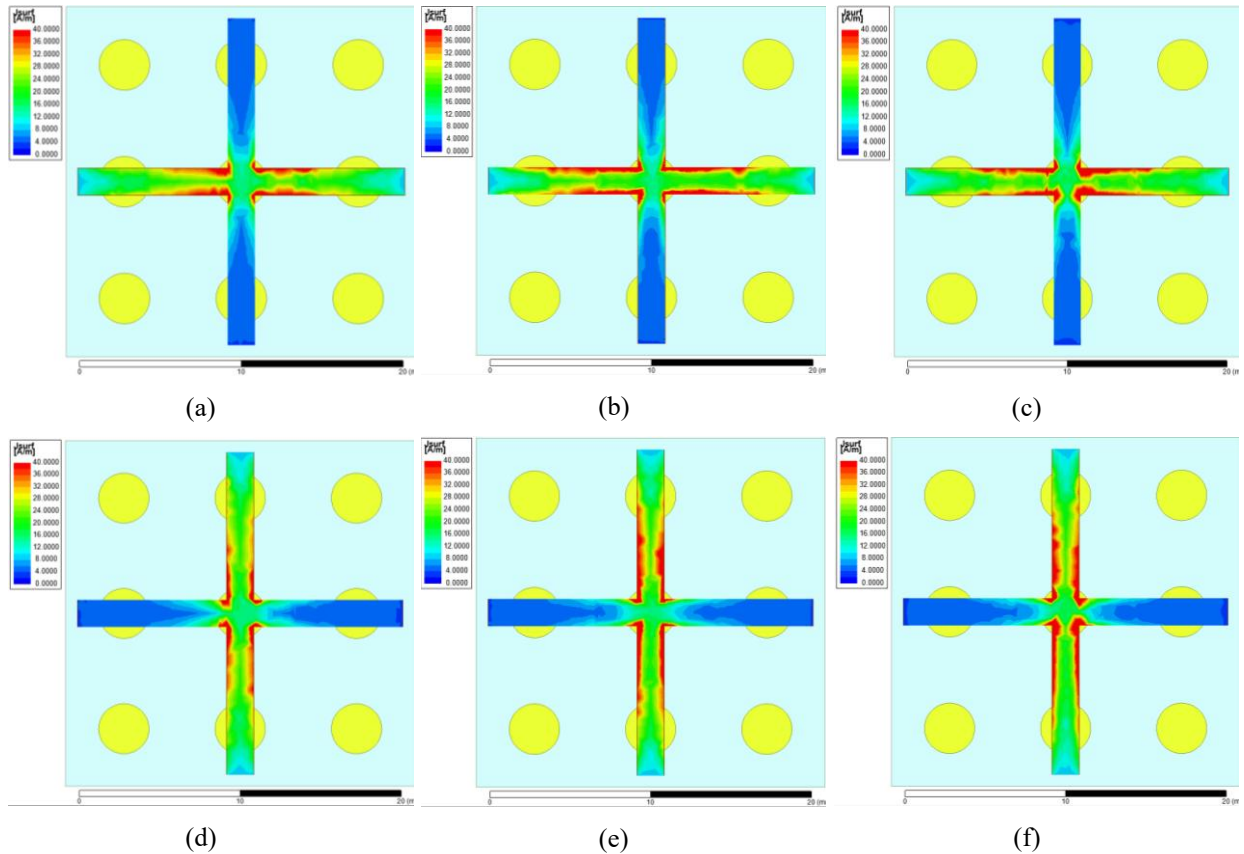
Figura 63 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS dipolo cruzado com substrato triplicado, incidência normal e polarizações: (a) TE e (b) TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Realizando a análise da FSS dipolo cruzado com a inserção das malhas/redes inspiradas em EBG, na Figura 64 é mostrado o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS dipolo cruzado com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com o diâmetro dos furos de 3mm e suas respectivas posições dos furos, a saber: posição do meio (M), posição final (F) e dupla camada (D); para ambas as polarizações, onde se verificou como as correntes elétricas se comportam na superfície metálica da FSS. Com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com diâmetro de 3mm, observou-se uma maior densidade de corrente nas fitas metálicas, sobretudo com maior intensidade na região dos cantos de junção entre as duas fitas inclusive com uma alcance maior de extensão ao longo da fita metálica de posição horizontal para o caso da polarização TE (vertical) e uma maior concentração e extensão ao longo da fita metálica de posição vertical para o caso da polarização TM (horizontal).

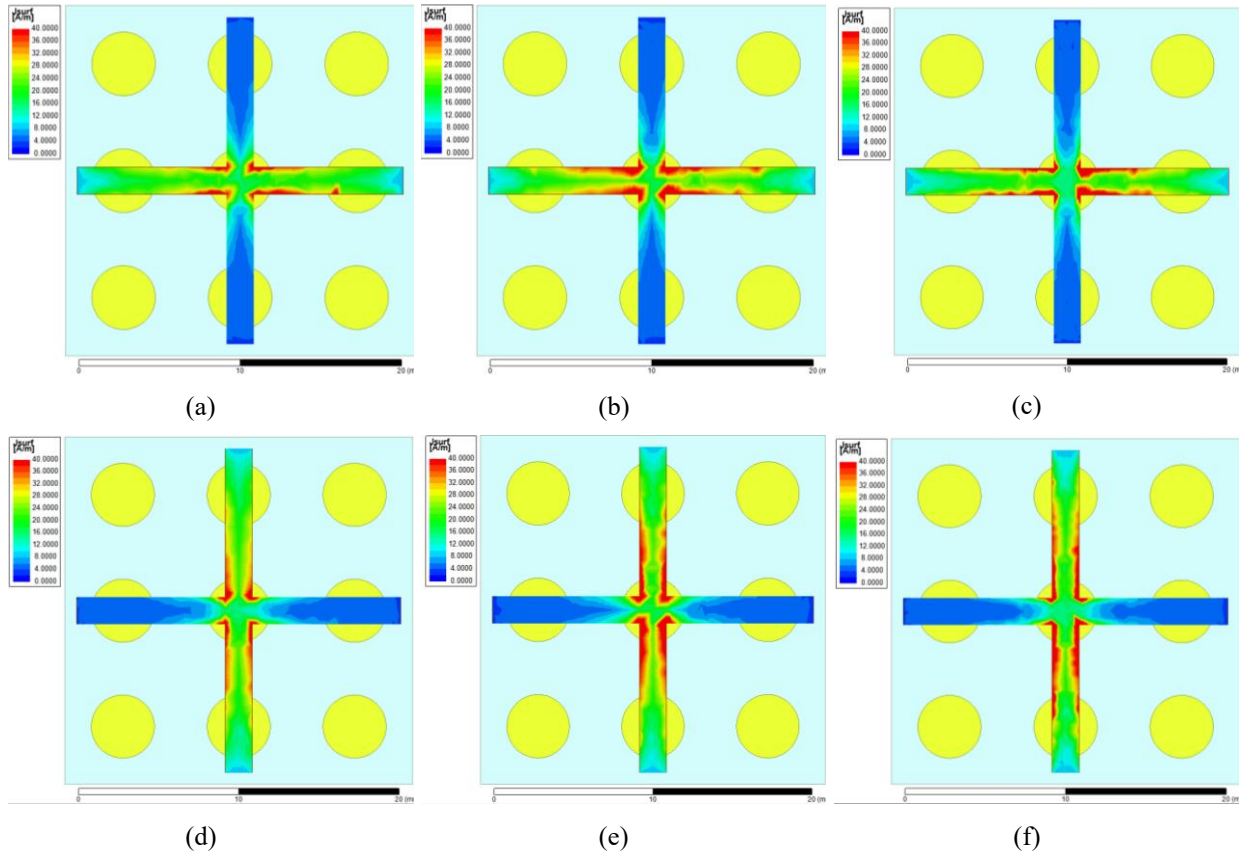
Figura 64 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS dipolo cruzado com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Seguindo as análises, na Figura 65 verifica-se o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS dipolo cruzado com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com o diâmetro dos furos de 4mm e suas respectivas posições dos furos, a saber: posição do meio (M), posição final (F) e dupla camada (D); para ambas as polarizações, onde se percebeu como as correntes elétricas se comportam na superfície metálica da FSS. Da mesma maneira como ocorreu para as malhas/redes inspiradas em EBG com diâmetro de 3mm, para o diâmetro de 4mm observou-se uma maior densidade superficial de corrente elétrica onde a concentração das correntes se mostraram mais intensas ao longo das fitas metálicas com destaque de maior concentração na região dos cantos de junção entre as duas fitas, o que torna claro que a presença dos furos causam um aumento na densidade superficial de corrente nos elementos metálicos. Em polarização TE (vertical) a concentração se dá no centro da fita metálica de posição horizontal com presença mais intensa na região dos cantos de junção das duas fitas e em polarização TM (horizontal) a concentração se dá no centro da fita metálica de posição vertical com o destaque de intensidade na região dos cantos de junção das duas fitas.

Figura 65 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS dipolo cruzado com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.

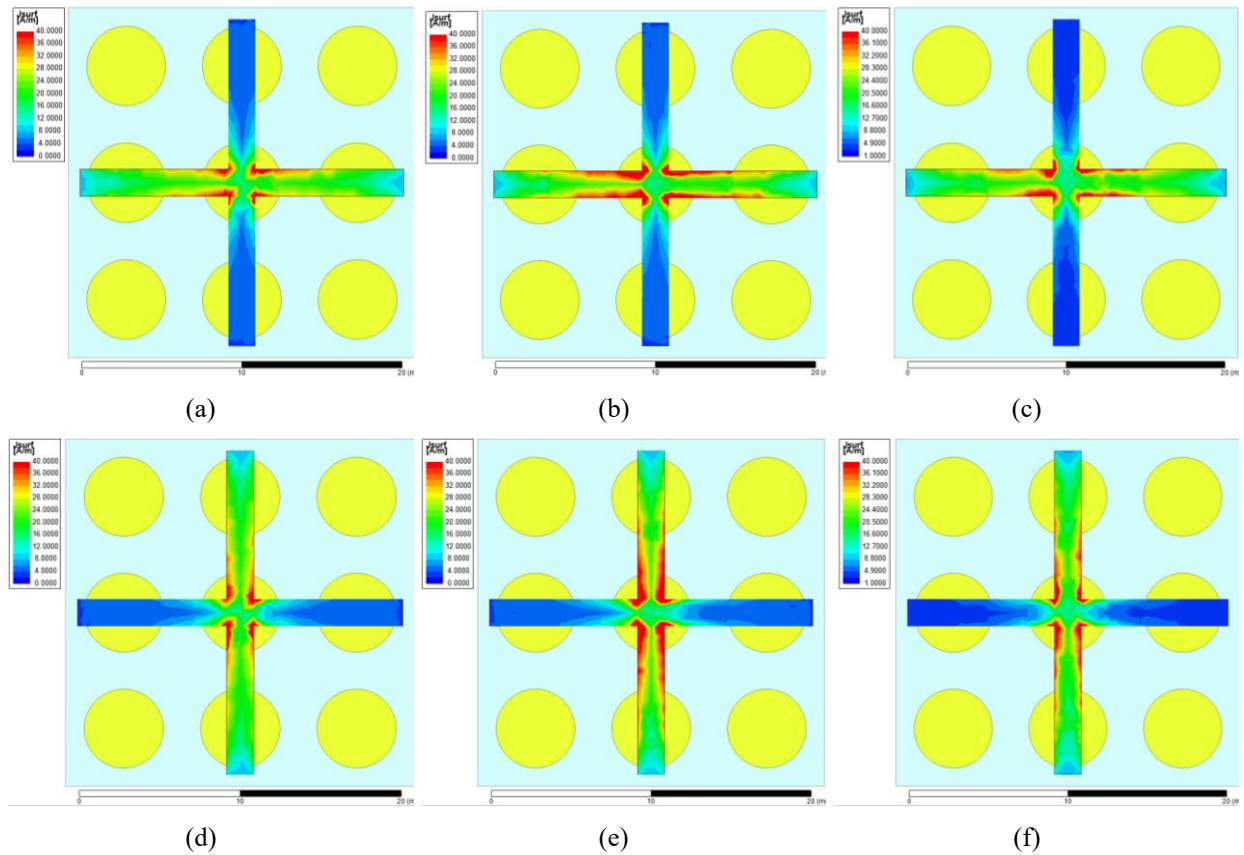


Fonte: Autoria própria, 2025.

Finalizando todas as análises para a FSS dipolo cruzado, na Figura 66 é possível verificar o comportamento da densidade superficial de corrente no elemento condutor da FSS dipolo cruzado com a presença das malhas/redes inspiradas em EBG com o diâmetro dos furos de 5mm e suas respectivas posições dos furos, a saber: posição do meio (M), posição final (F) e dupla camada (D); para ambas as polarizações, onde se observou o comportamento das correntes elétricas ao longo da superfície metálica da FSS. Assim como nos demais casos analisados anteriormente, a presença das malhas/redes inspiradas em EBG agora com diâmetro de 5mm, gerou uma maior densidade de corrente ao longo das fitas metálicas com maior intensidade na região dos cantos de junção das duas fitas comparando com os resultados observados na FSS padrão de referência e na FSS de substrato triplicado, mais uma vez mostrando a influência que a presença dos furos causa na distribuição das correntes nos elementos metálicos. Para a polarização TE (vertical) a intensidade da densidade de corrente superficial se deu no centro da fita metálica de posição horizontal com uma maior

concentração na região dos cantos de junção das duas fitas, já para o caso da polarização TM (horizontal) a intensidade da densidade de corrente superficial se deu no centro da fita metálica de posição vertical com uma maior concentração na região dos cantos de junção das duas fitas.

Figura 66 – Densidade superficial de corrente (J) na FSS dipolo cruzado com malha/rede 3x3 inspirada em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, incidência normal e ambas as polarizações: (a) TE na posição M, (b) TE na posição F, (c) TE na posição D, (d) TM na posição M, (e) TM na posição F e (f) TM na posição D.



Fonte: Autoria própria, 2025.

4.2 Resultados experimentais

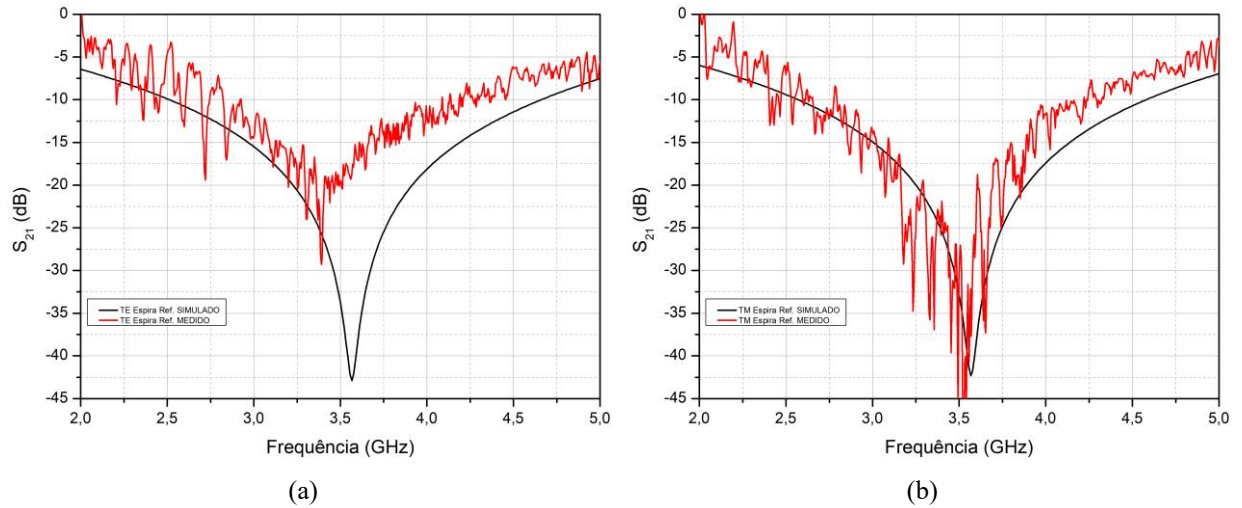
Após toda a etapa de simulação das estruturas FSS adotadas como padrão de referência, as FSS com substrato triplicado e também todas as outras configurações e suas variações envolvendo a inserção de malhas/redes inspiradas em EBG, procedeu-se com a etapa de medição com a execução do procedimento e utilização do *setup* anteriormente descrito, onde cada estrutura FSS e as placas furadas que servirão como malhas/redes inspiradas em EBG propostas neste trabalho já devidamente confeccionadas, tiveram seu

comportamento da resposta em frequência medido sendo os mesmos parâmetros observados na etapa de simulação, com exceção da densidade de corrente superficial (J), pois está só foi observada em ambiente de simulação.

Seguindo o mesmo procedimento adotado durante as simulações, visando observar a influência das configurações de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG na resposta em frequência da FSS espira quadrada, anel circular e dipolo cruzado, todas de referência, e então se realizar uma análise eficiente e uma comparação entre os resultados, seguimos no estudo comparando o desempenho experimental medido das FSS padrão de referência, das FSS de substrato triplicado e das variações das posições dos furos (e altura) em cada diâmetro definido, a saber: 3mm, 4mm e 5mm; com incidência normal da onda eletromagnética tanto para a polarização TE (polarização vertical) quanto para a polarização TM (polarização horizontal). Os resultados obtidos através do analisador de redes vetoriais (VNA, do inglês *Vector Network Analyzer*) referência VNA R&S® ZND 100 kHz-8,5 GHz, foram exportados e tratados no MATLAB®, através de uma rotina computacional, a fim de melhorar o comportamento da resposta e reduzir o nível de ruído e interferência na mesma. De posse dos resultados tratados, os gráficos foram gerados e sobrepostos aos gráficos obtidos durante a etapa de simulação, com o objetivo de validar os dados simulados através dos resultados experimentais e de melhorar a percepção do comportamento da resposta em frequência de todas as estruturas e as suas respectivas variações propostas neste trabalho.

Na Figura 67 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS espira quadrada de referência, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

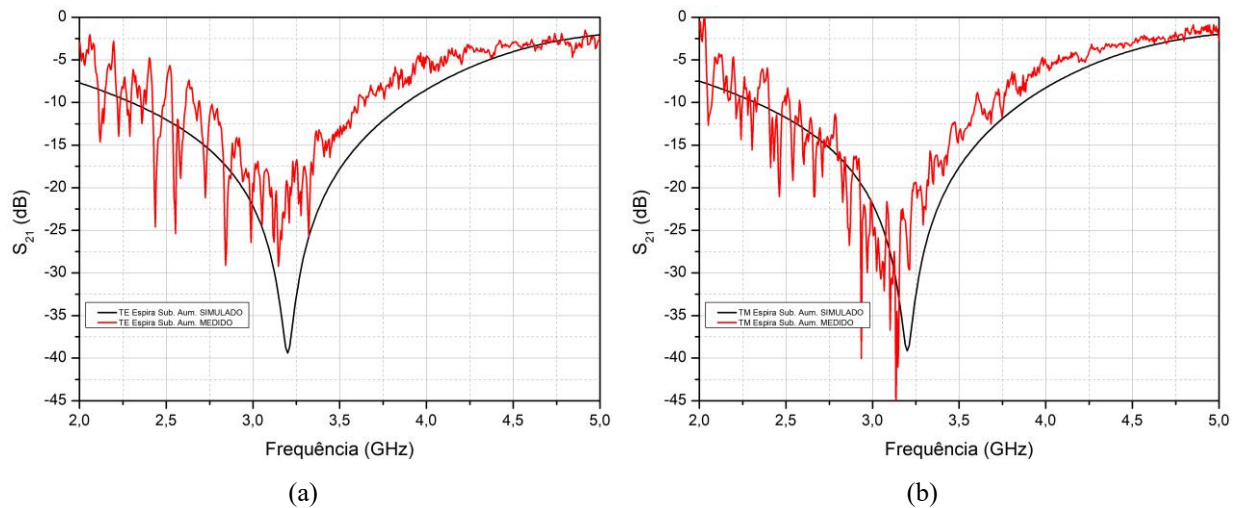
Figura 67 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada de referência para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 68 é observado o comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS espira quadrada com substrato triplicado, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 68 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com substrato triplicado para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.

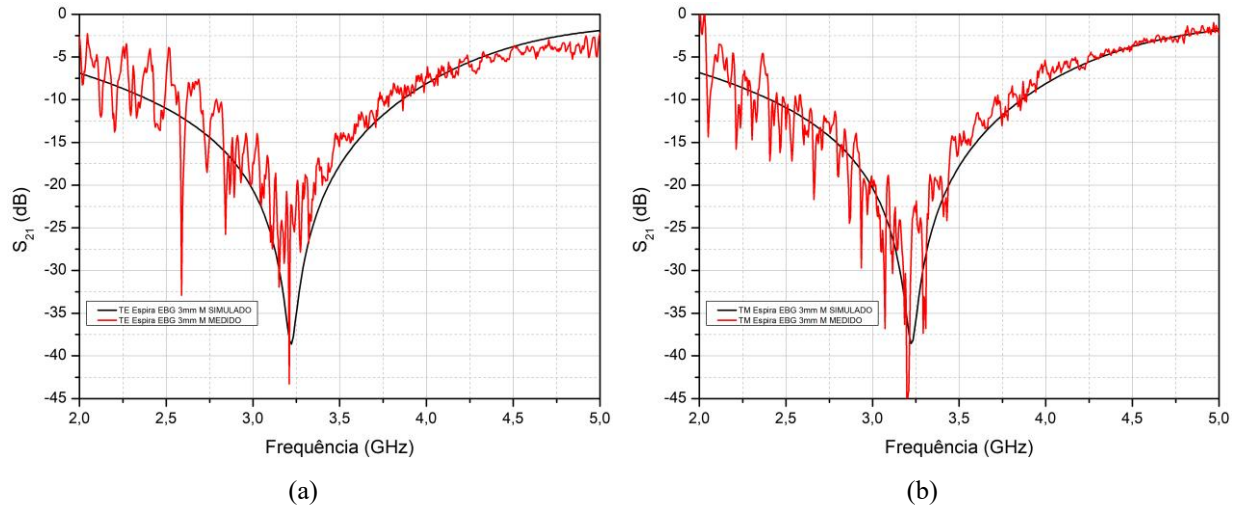


Fonte: Autoria própria, 2025.

Nas Figuras 69, 70 e 71, é possível observar o comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, tanto para a polarização TE (vertical)

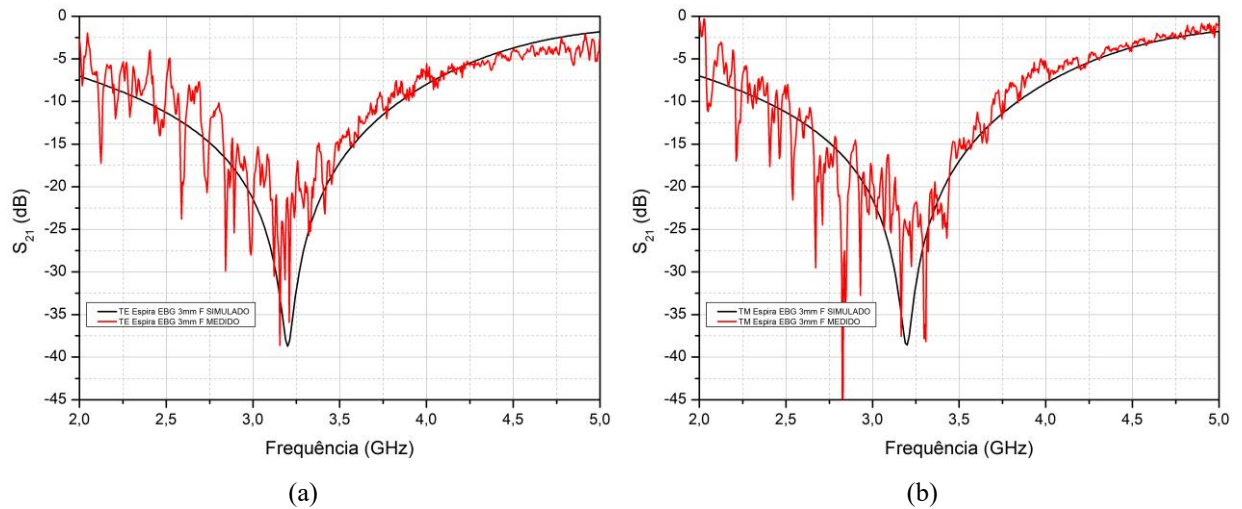
quanto para a polarização TM (horizontal), com os furos na posição do meio (M), na posição final (F) e de dupla camada (D), respectivamente. São observados os valores de coeficiente de transmissão (S_{21}), os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 69 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



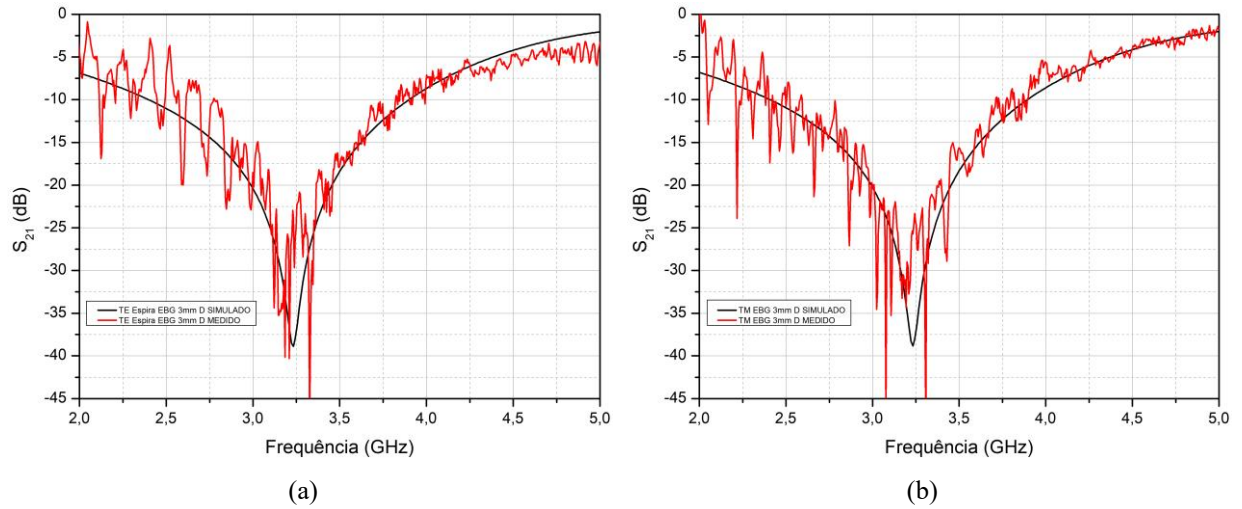
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 70 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

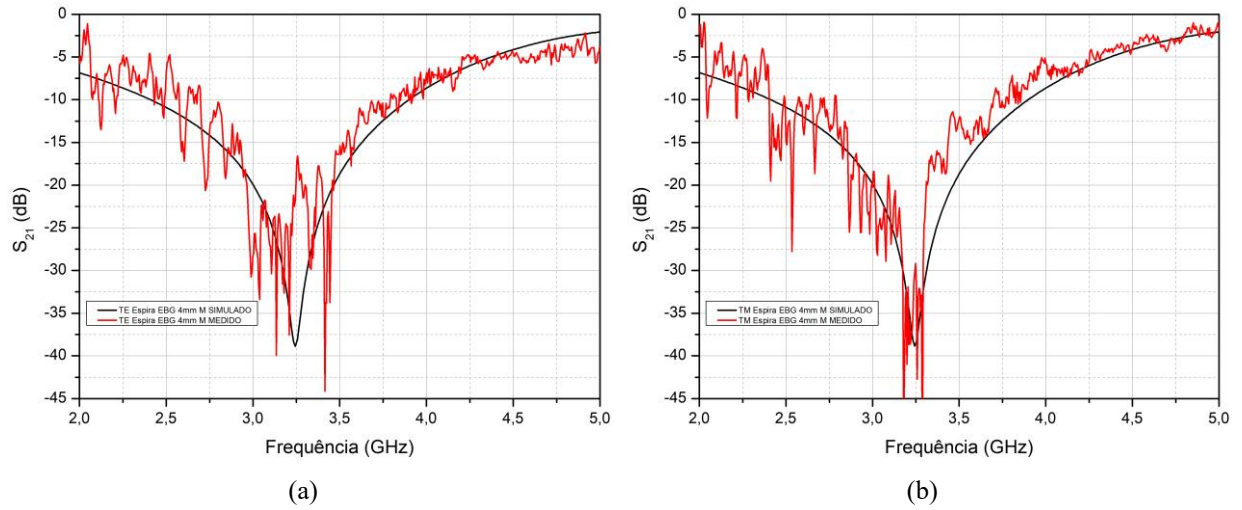
Figura 71 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

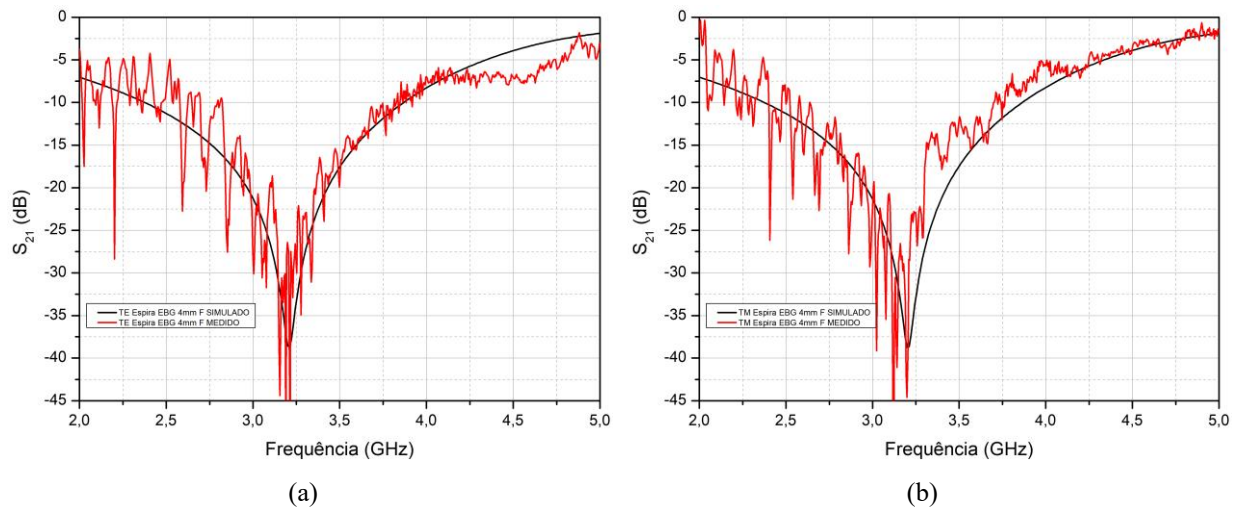
Assim como foi realizada a análise do comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, procedeu-se também para o diâmetro dos furos de 4mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal). As Figuras 72, 73 e 74, permitem visualizar as respostas considerando os furos na posição do meio (M), na posição final (F) e de dupla camada (D), respectivamente. São observados os valores de coeficiente de transmissão (S_{21}), os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 72 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



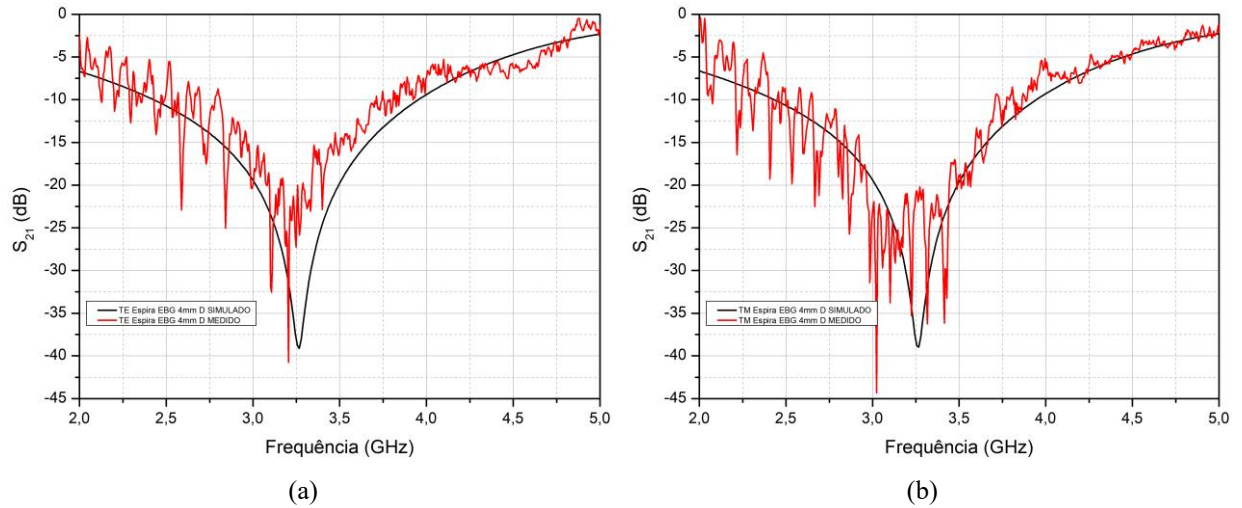
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 73 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

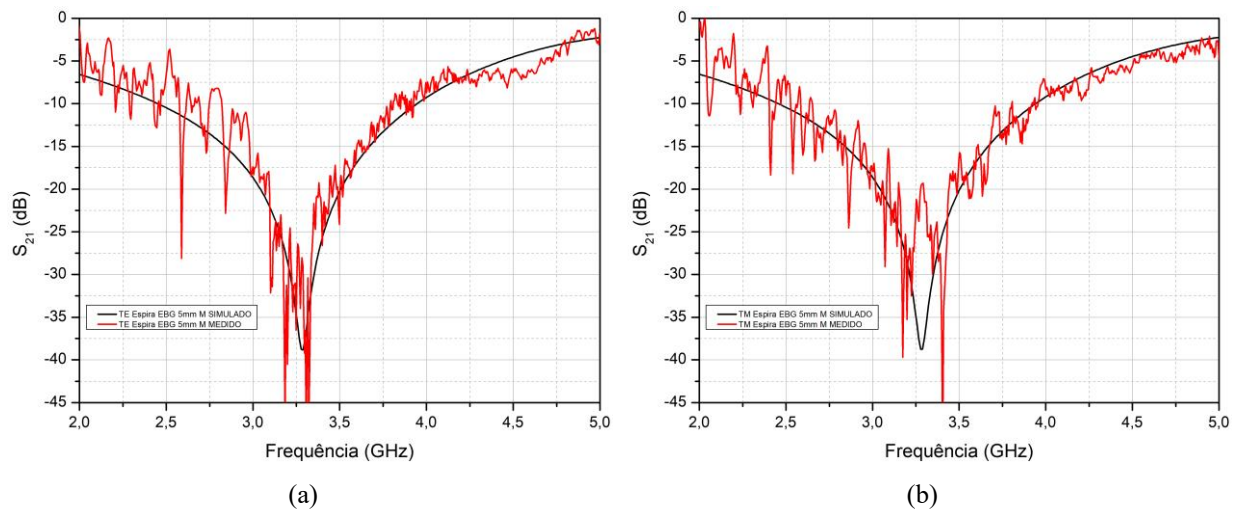
Figura 74 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

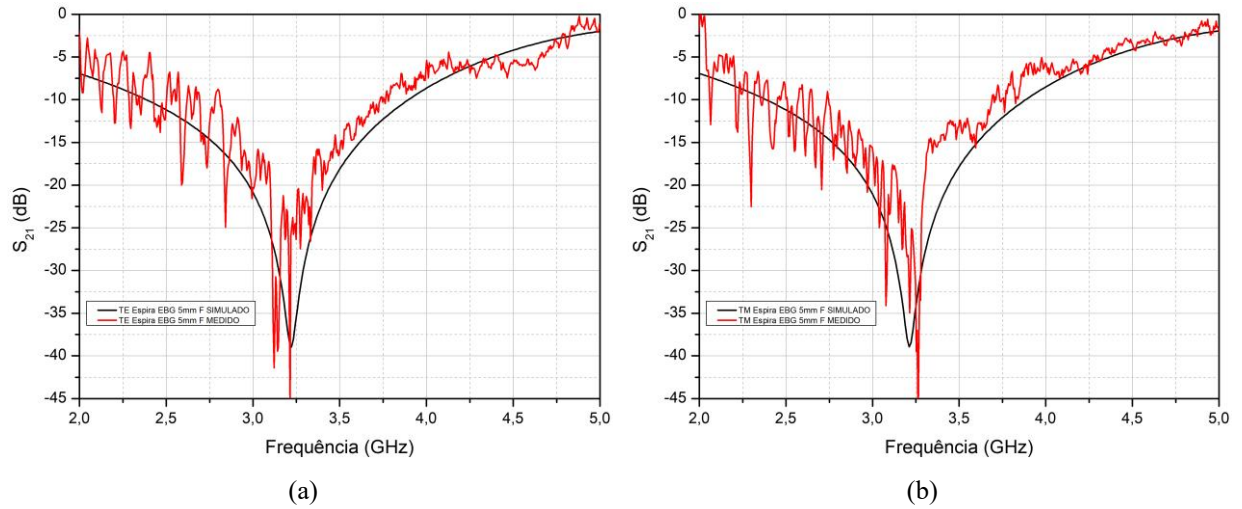
Para finalizar a análise envolvendo a FSS espira quadrada, foi realizado o estudo do comportamento da resposta em frequência simulado e medido considerando a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal). As Figuras 75, 76 e 77, mostram as respostas considerando os furos na posição do meio (M), na posição final (F) e de dupla camada (D), respectivamente. São observados os valores de coeficiente de transmissão (S_{21}), os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 75 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



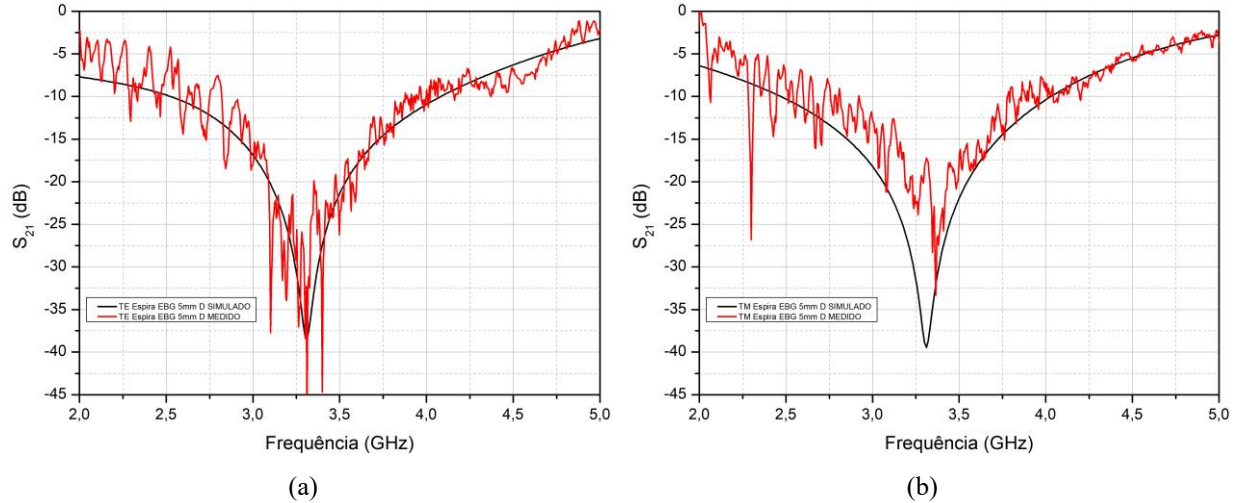
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 76 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 77 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Observando os gráficos apresentados que relacionam os dados simulados com os dados obtidos nas medições experimentais, foi possível perceber que o comportamento das curvas com valores medidos apresentou semelhança ao comportamento ideal das curvas com valores simulados, tanto em polarização TE (vertical) quanto em polarização TM (horizontal), o que valida as análises feitas anteriormente na fase de simulação. Os valores medidos experimentalmente do coeficiente de transmissão (S_{21}), frequência de ressonância (f_r) e da

largura de banda (BW) apresentaram algumas pequenas diferenças e certos ruídos comparando com os valores simulados, relacionadas a imperfeições presentes no próprio *setup* de medição, tais como: falta de uma câmara anecóica apropriada, absorvedores utilizados não ideais, perdas ao longo dos cabos e conectores, possíveis interferências/ruídos presentes no laboratório, pequenos desvios no alinhamento das antenas transmissora e receptora, dentre outras variáveis que podem interferir nas medições. Mesmo com a percepção de mudança nos valores das variáveis citadas é notório que o comportamento da resposta em frequência das diversas curvas apresentadas mantém semelhança entre si, validando os resultados obtidos.

Para a espira quadrada de referência percebeu-se um valor experimental medido para o coeficiente de transmissão (S_{21}) de -26,5455 dB na frequência de ressonância (f_r) de 3,3900 GHz na polarização TE (vertical), além de uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 1,39 GHz. Para a polarização TM (horizontal), a espira quadrada de referência apresentou um valor experimental medido S_{21} de -49,7157 dB na frequência f_r de 3,5318 GHz, com uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 1,45 GHz.

Já para o caso da espira quadrada com substrato triplicado observou-se um valor experimental medido para o coeficiente de transmissão (S_{21}) de -27,1050 dB na frequência de ressonância (f_r) de 3,1554 GHz na polarização TE (vertical), além de uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 1,00 GHz. Para a polarização TM (horizontal), a espira quadrada de referência apresentou um valor experimental medido S_{21} de -38,6703 dB na frequência f_r de 3,1408 GHz, com uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 1,10 GHz. Assim como aconteceu durante as simulações das estruturas FSS padrão de referência e a de substrato triplicado, o fato de se aumentar a altura do substrato gerou um deslocamento na frequência de ressonância para abaixo da f_r da estrutura FSS padrão, bem como um estreitamento na largura de banda, validando-se assim os resultados obtidos nas simulações com base no comportamento observado nos resultados experimentais medidos.

Analisando as respostas em frequência das malhas/redes inspiradas em EBG, considerando o diâmetro dos furos de 3mm e as respectivas posições propostas, a saber: posição do meio (M), posição final (F) e posição dupla camada (D); obteve-se os seguintes valores respectivos para as posições supracitadas, para f_r de 3,2092 GHz (S_{21} de -29,0700 dB), 3,1554 GHz (S_{21} de -29,3480 dB) e 3,3363 GHz (S_{21} de -35,0577 dB), considerando polarização TE (vertical). Para polarização TM (horizontal) obteve-se os seguintes valores respectivos para as posições supracitadas, para f_r de 3,2043 GHz (S_{21} de -41,3761 dB), 3,3021

GHz (S_{21} de -33,8550 dB) e 3,3021 GHz (S_{21} de -33,2100 dB). Os valores de BW na polarização TE (vertical) foram de 1,08 GHz, 1,09 GHz e 1,14 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM (horizontal) os valores foram de 1,39 GHz, 1,22 GHz e 1,30 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

Considerando o diâmetro dos furos das malhas/redes inspiradas em EBG de 4mm e a mesma sequência adotada anteriormente para as posições dos furos, ou seja, posição do meio (M), posição final (F) e posição dupla camada (D), foram obtidos os seguintes valores para f_r de 3,4194 GHz (S_{21} de -32,6759 dB), 3,2190 GHz (S_{21} de -35,4765 dB) e 3,1945 GHz (S_{21} de -29,4333 dB), considerando polarização TE (vertical). Os valores obtidos em polarização TM (horizontal) foram de f_r de 3,1896 GHz (S_{21} de -39,1901 dB), 3,1310 GHz (S_{21} de -40,9896 dB) e 3,4194 GHz (S_{21} de -32,2321 dB). Os valores de BW na polarização TE (vertical) foram de 1,11 GHz, 1,13 GHz e 1,12 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM (horizontal) os valores foram de 1,30 GHz, 1,21 GHz e 1,29 GHz, respectivamente para as mesmas posições.

Para finalizar a análise da FSS espira quadrada, verificou-se o caso do diâmetro dos furos das malhas/redes inspiradas em EBG de 5mm, na mesma sequência para a posição dos furos adotada anteriormente, foram obtidos os seguintes valores para f_r de 3,3167 GHz (S_{21} de -41,0787 dB), 3,1310 GHz (S_{21} de -36,0119 dB) e 3,3069 GHz (S_{21} de -36,6808 dB), considerando polarização TE (vertical). Os valores obtidos em polarização TM (horizontal) foram de f_r de 3,4096 GHz (S_{21} de -37,0620 dB), 3,2630 GHz (S_{21} de -38,8199 dB) e 3,3705 GHz (S_{21} de -28,5330 dB). Os valores de BW na polarização TE (vertical) foram de 1,19 GHz, 1,07 GHz e 1,20 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM (horizontal) os valores foram de 1,29 GHz, 1,16 GHz e 1,23 GHz, respectivamente para as mesmas posições.

Assim como foi observado nos resultados das simulações, para os resultados experimentais medidos foi verificado que o aumento no substrato da FSS gera um deslocamento na frequência do dispositivo para abaixo da frequência de ressonância do dispositivo padrão de referência, em ambas as polarizações TE (vertical) e TM (horizontal). Quando se considera a inserção de malhas/redes inspiradas em EBG tem-se o comportamento semelhante ao observado nas simulações, onde as malhas/redes que apresentam os furos na posição final (F) possuem as frequências de ressonância mais baixas. Nas posições de meio (M) e de dupla camada (D) as frequências tendem a ser maiores, se aproximando da frequência de ressonância do dispositivo padrão. Além disso, à medida que os diâmetros dos

furos vão aumentando, a frequência de ressonância do dispositivo também tende a aumentar, novamente em ambas as polarizações consideradas. Para os valores de largura de banda, estes também tendem a aumentar a medida que os diâmetros dos furos vão aumentando, no entanto, sempre se mantêm abaixo dos valores verificados para os dispositivos padrão, também em ambas as polarizações TE (vertical) e TM (horizontal).

Os resultados das respostas em frequência contendo os parâmetros de frequência de ressonância (f_r), coeficiente de transmissão (S_{21}) e largura de banda (BW) obtidos nas medições experimentais realizadas através do *setup* de medição e já descritos anteriormente para a FSS espira quadrada de referência, espira de substrato triplicado e as demais configurações propostas incluindo as malhas/redes inspiradas em EBG e as suas respectivas variações na posição dos furos estão contidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados experimentais medidos das respostas em frequência da FSS espira quadrada de referência, espira de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.

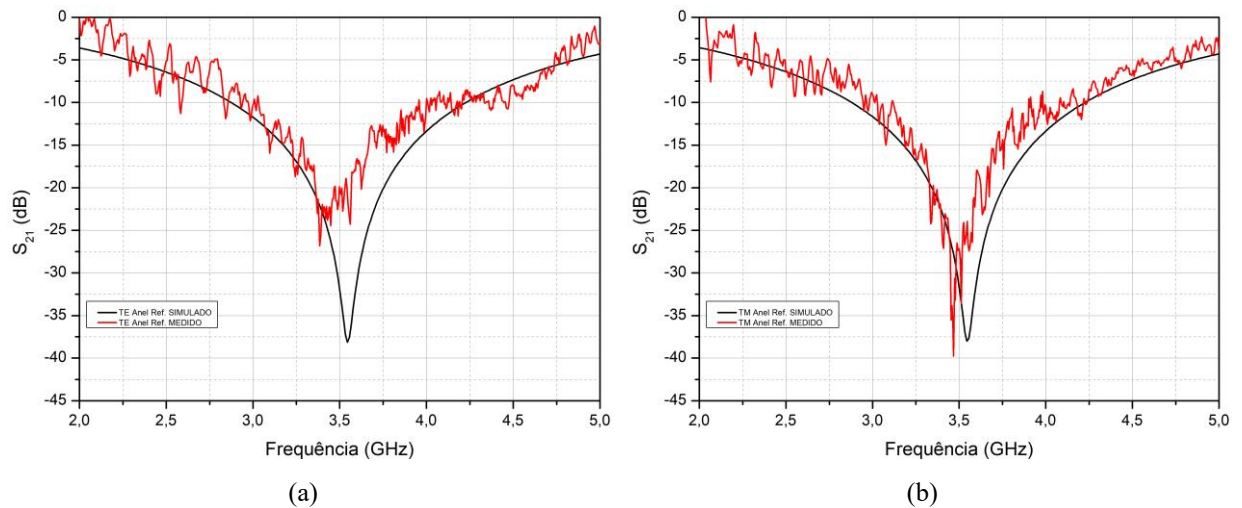
Estrutura	Frequência (GHz)		S_{21} (dB)		BW (GHz)	
	TE	TM	TE	TM	TE	TM
FSS espira quadrada referência	3,3900	3,5318	-26,5455	-49,7157	1,39	1,45
FSS substrato triplicado	3,1554	3,1408	-27,1050	-38,6703	1,00	1,10
FSS EBG 3mm – M	3,2092	3,2043	-29,0700	-41,3761	1,08	1,39
FSS EBG 3mm – F	3,1554	3,3021	-29,3480	-33,8550	1,09	1,22
FSS EBG 3mm – D	3,3363	3,3021	-35,0577	-33,2100	1,14	1,30
FSS EBG 4mm – M	3,4194	3,1896	-32,6759	-39,1901	1,11	1,30
FSS EBG 4mm – F	3,2190	3,1310	-35,4765	-40,9896	1,13	1,21
FSS EBG 4mm – D	3,1945	3,4194	-29,4333	-32,2321	1,12	1,29

FSS EBG 5mm – M	3,3167	3,4096	-41,0787	-37,0620	1,19	1,29
FSS EBG 5mm – F	3,1310	3,2630	-36,0119	-38,8199	1,07	1,16
FSS EBG 5mm – D	3,3069	3,3705	-36,6808	-28,5330	1,20	1,23

Fonte: Autoria própria, 2025.

Após a finalização da análise envolvendo a FSS espira quadrada e todas as respectivas variações observadas neste trabalho, procedeu-se com a análise da FSS anel circular para todas as mudanças propostas. Na Figura 78 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS anel circular de referência, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

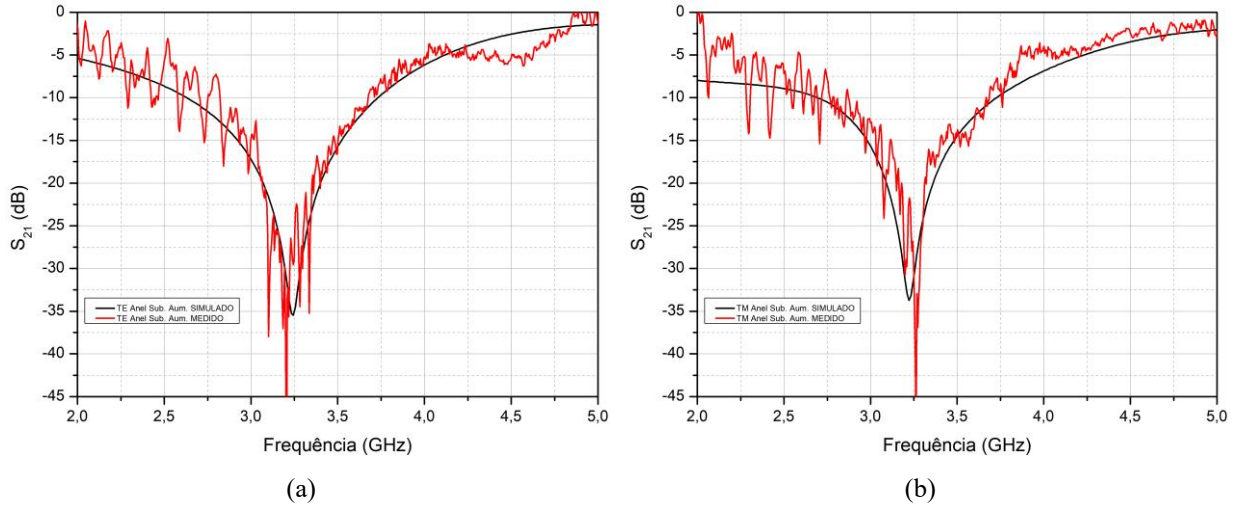
Figura 78 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular de referência para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 79 é mostrado o comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS anel circular com substrato triplicado, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

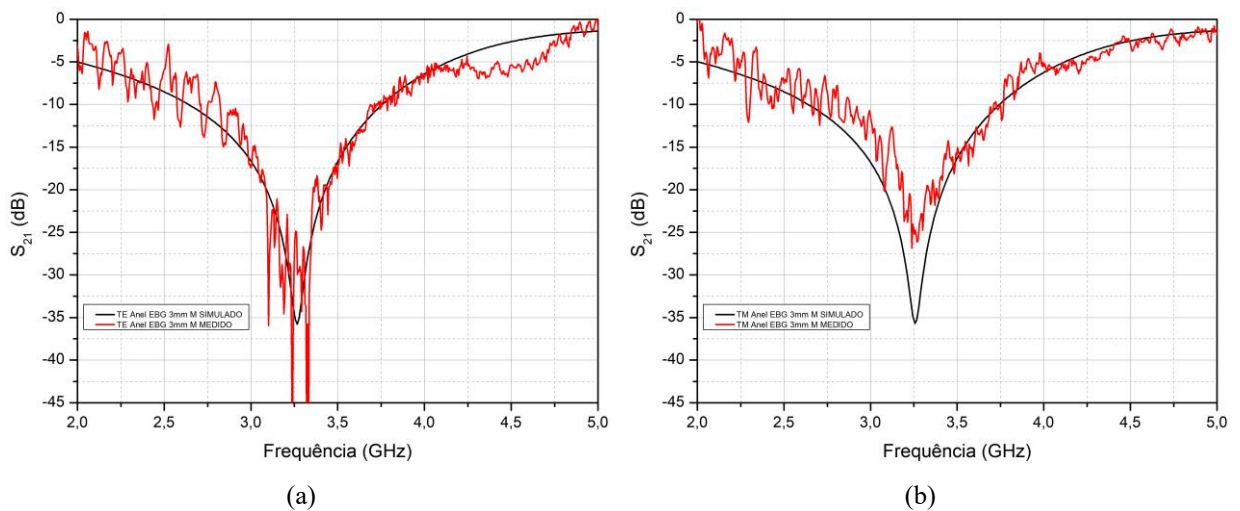
Figura 79 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular com substrato triplicado para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

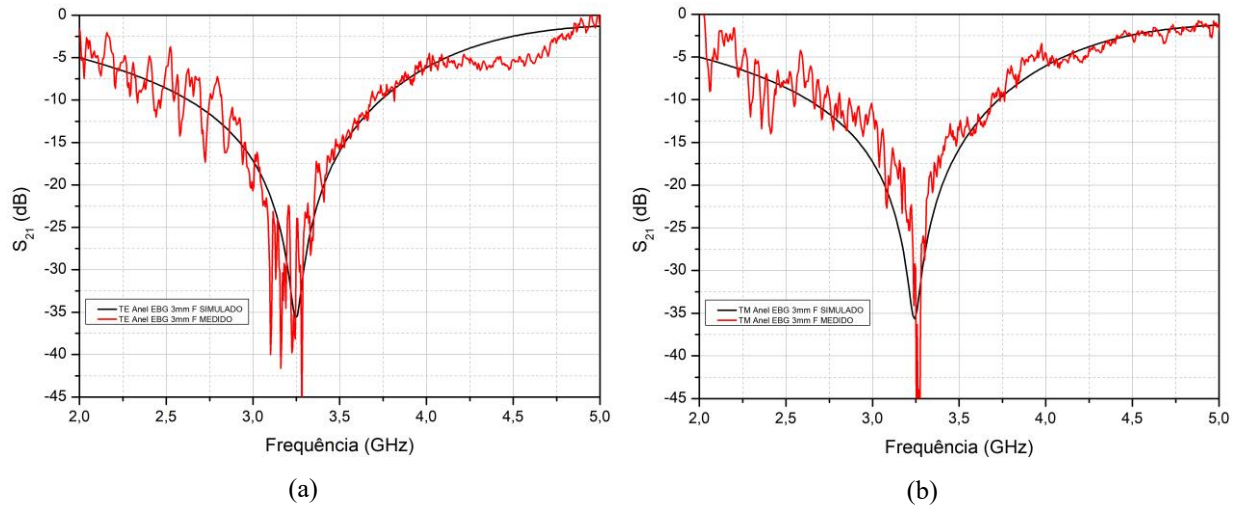
Nas Figuras 80, 81 e 82, é possível verificar o comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), com os furos na posição do meio (M), na posição final (F) e de dupla camada (D), respectivamente. São observados os valores de coeficiente de transmissão (S_{21}), os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 80 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



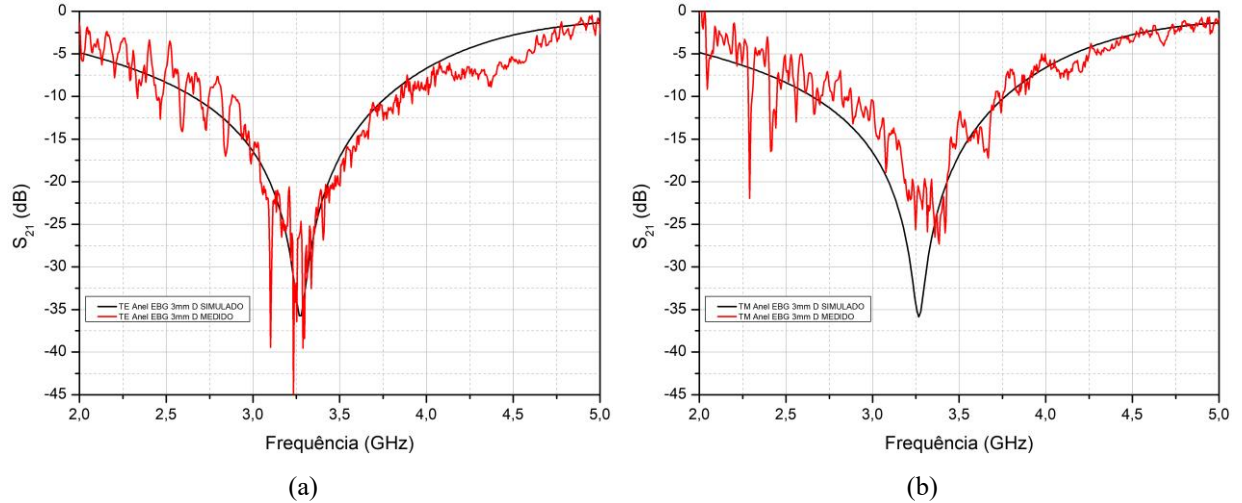
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 81 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS espira quadrada com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 82 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.

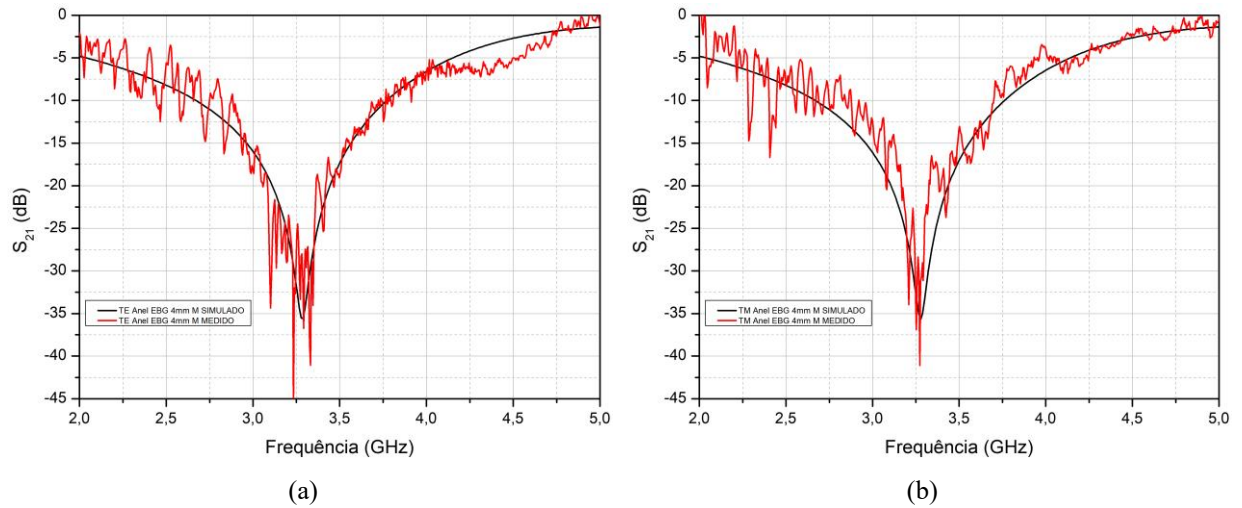


Fonte: Autoria própria, 2025.

Seguindo o padrão adotado para se analisar e verificar o comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, procedeu-se também para o diâmetro dos furos de 4mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal). As Figuras 83, 84 e 85, permitem visualizar as respostas considerando os furos na posição do meio (M), na posição final (F) e de dupla camada (D), respectivamente. São

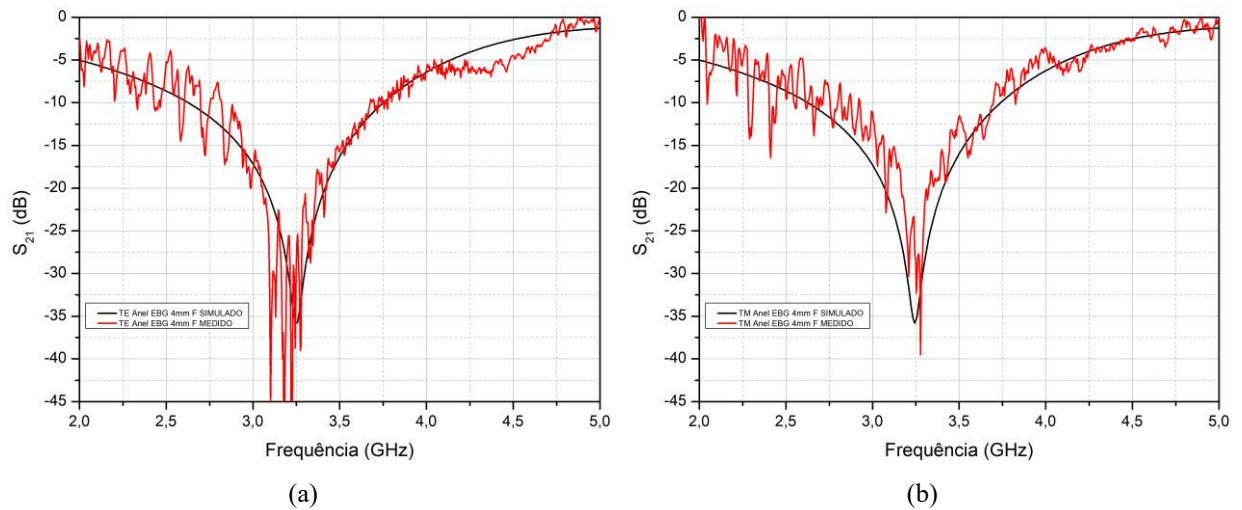
observados os valores de coeficiente de transmissão (S_{21}), os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 83 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



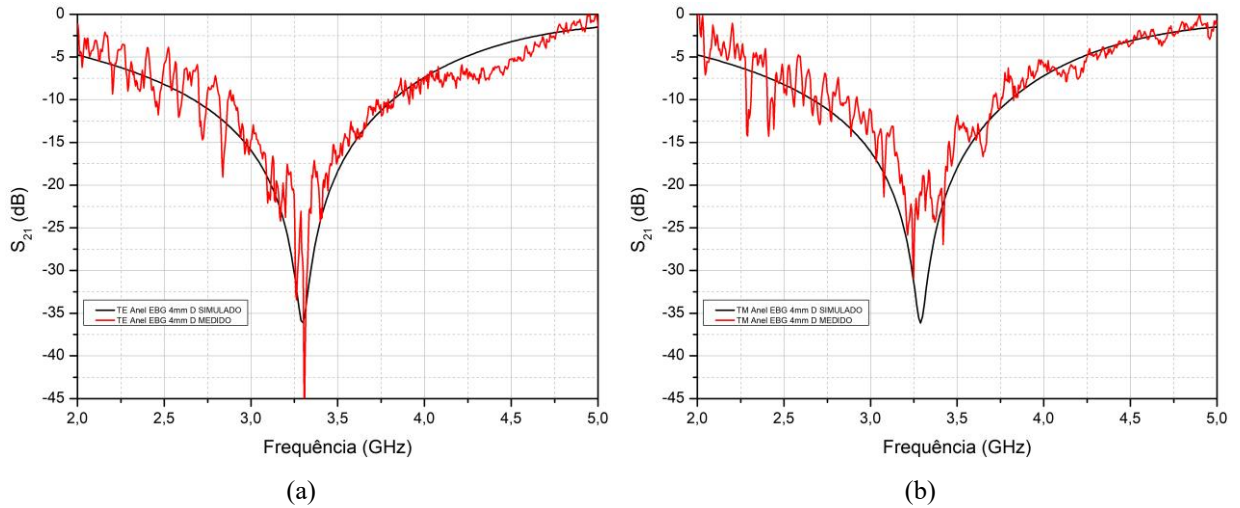
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 84 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

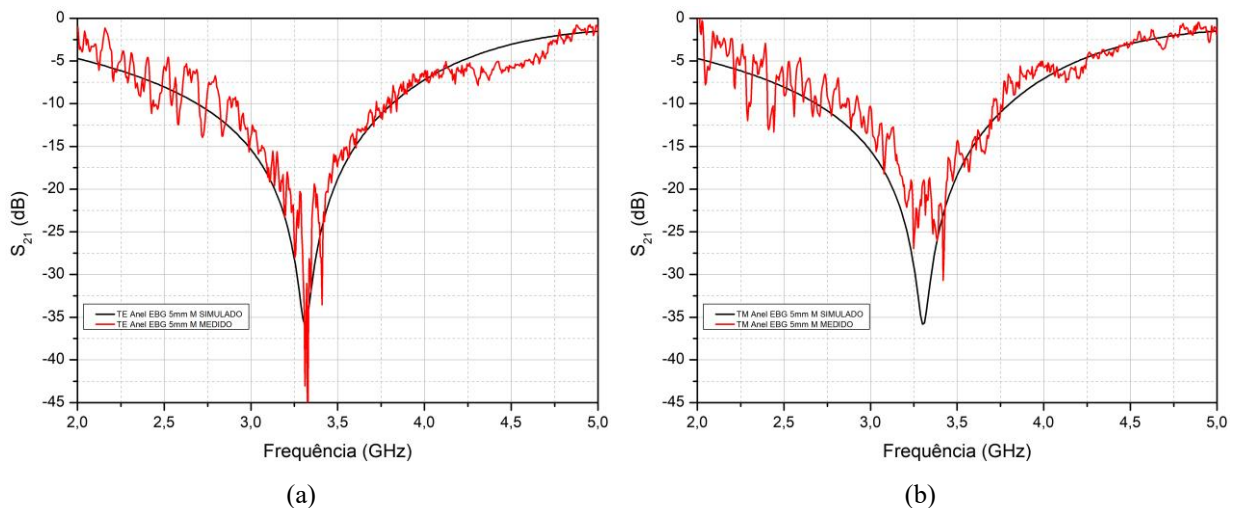
Figura 85 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

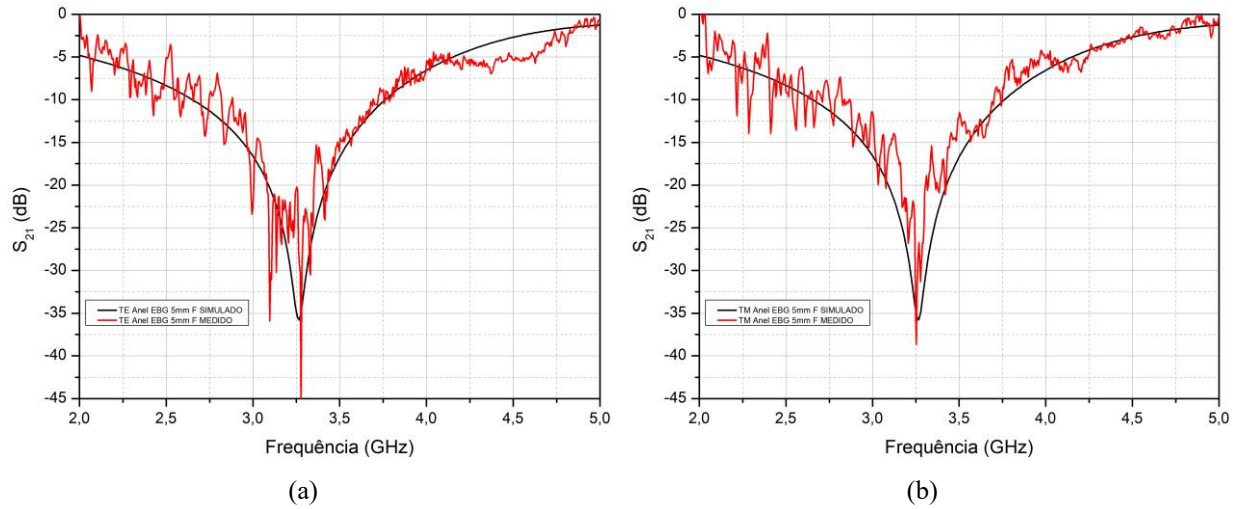
Para concluir a análise envolvendo a FSS anel circular, foi executado o estudo do comportamento da resposta em frequência simulado e medido considerando a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal). As Figuras 86, 87 e 88, mostram as respostas considerando os furos na posição do meio (M), na posição final (F) e de dupla camada (D), respectivamente. São observados os valores de coeficiente de transmissão (S_{21}), os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 86 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



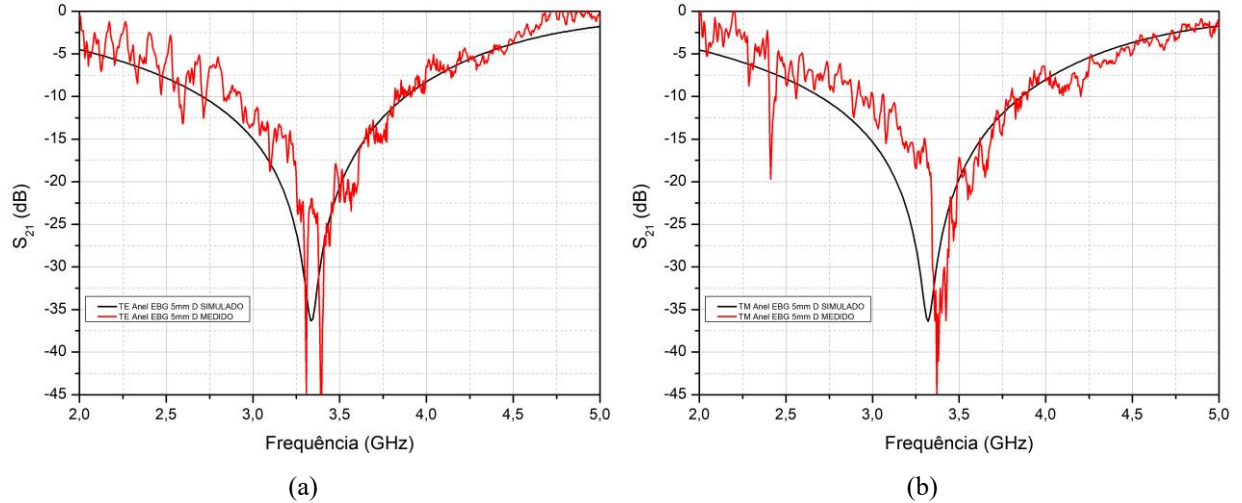
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 87 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 88 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS anel circular com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Analisando os gráficos apresentados que fazem a correlação entre os dados simulados com os dados obtidos nas medições experimentais, percebeu-se que assim como para a FSS espira quadrada, para o caso da FSS anel circular o comportamento das curvas com valores medidos apresentou características semelhantes ao comportamento ideal das curvas com valores simulados, em ambas as polarizações consideradas, mais uma vez validando as considerações realizadas durante o processo de simulação. Os valores medidos

experimentalmente do coeficiente de transmissão (S_{21}), frequência de ressonância (f_r) e da largura de banda (BW) também apresentaram certas diferenças com os valores simulados, como aconteceu para a análise envolvendo a FSS espira quadrada, onde todas as considerações mencionadas anteriormente no tocante a imperfeições no *setup* de medição permanecem válidas causando desvios nos resultados das medições experimentais. Mesmo com a percepção de mudança nos valores das variáveis citadas é possível observar a correlação e semelhança do comportamento da resposta em frequência das diversas curvas apresentadas e, novamente, atesta a validação dos resultados obtidos e análises realizadas.

Para o anel circular de referência percebeu-se um valor experimental medido para o coeficiente de transmissão (S_{21}) de -24,4060 dB na frequência de ressonância (f_r) de 3,3900 GHz na polarização TE (vertical), além de uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 1,17 GHz. Para a polarização TM (horizontal), o anel circular de referência apresentou um valor experimental medido S_{21} de -35,1379 dB na frequência f_r de 3,4633 GHz, com uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 1,19 GHz.

Quando da FSS anel circular com substrato triplicado verificou-se um valor experimental medido para o coeficiente de transmissão (S_{21}) de -38,7950 dB na frequência de ressonância (f_r) de 3,2092 GHz na polarização TE (vertical), além de uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 0,91 GHz. Para a polarização TM (horizontal), a espira quadrada de referência apresentou um valor experimental medido S_{21} de -38,2619 dB na frequência f_r de 3,2678 GHz, com uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 0,92 GHz. Mais uma vez fica evidenciado que o aumento na altura do substrato gera um deslocamento na frequência de ressonância para abaixo da f_r da estrutura FSS padrão, além do estreitamento na largura de banda, confirmando assim os resultados obtidos nas simulações associando ao comportamento observado nos resultados experimentais medidos.

Verificando as respostas em frequência das malhas/redes inspiradas em EBG adotadas neste trabalho, considerando o diâmetro dos furos de 3mm e as respectivas posições propostas e a sequência já definida anteriormente (posição do meio (M), posição final (F) e posição dupla camada (D)), chegou-se nos seguintes valores respectivos sendo para f_r de 3,3216 GHz (S_{21} de -41,3490 dB), 3,2336 GHz (S_{21} de -37,9660 dB) e 3,2434 GHz (S_{21} de -35,8932 dB), considerando polarização TE (vertical). Em polarização TM (horizontal) verificou-se os seguintes valores respectivos nas posições supracitadas, sendo para f_r de 3,2678 GHz (S_{21} de -25,5063 dB), 3,2630 GHz (S_{21} de -44,6693 dB) e 3,3851 GHz (S_{21} de -25,6023 dB). Os valores de BW na polarização TE (vertical) foram de 0,94 GHz, 0,89 GHz e 1,04 GHz, para

as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM (horizontal) os valores foram de 0,95 GHz, 0,95 GHz e 0,93 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

Para o diâmetro dos furos das malhas/redes inspiradas em EBG de 4mm e a mesma sequência adotada anteriormente para as posições dos furos, foram obtidos os seguintes valores para f_r de 3,3363 GHz (S_{21} de -34,7532 dB), 3,1799 GHz (S_{21} de -42,3263 dB) e 3,3118 GHz (S_{21} de -36,9989 dB), considerando polarização TE (vertical). Os valores obtidos em polarização TM (horizontal) foram de f_r de 3,2630 GHz (S_{21} de -33,5221 dB), 3,2776 GHz (S_{21} de -31,1580 dB) e 3,2483 GHz (S_{21} de -26,2543 dB). Os valores de BW na polarização TE (vertical) foram de 0,99 GHz, 0,96 GHz e 1,01 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM (horizontal) os valores foram de 0,87 GHz, 0,90 GHz e 0,93 GHz, respectivamente para as mesmas posições.

Fechando a análise da FSS anel circular, observou-se o caso do diâmetro dos furos das malhas/redes inspiradas em EBG de 5mm, na mesma sequência para a posição dos furos adotada anteriormente, foram obtidos os seguintes valores para f_r de 3,3216 GHz (S_{21} de -39,2936 dB), 3,2727 GHz (S_{21} de -32,7154 dB) e 3,3949 GHz (S_{21} de -40,4252 dB), considerando polarização TE (vertical). Os valores obtidos em polarização TM (horizontal) foram de f_r de 3,4194 GHz (S_{21} de -25,3571 dB), 3,2581 GHz (S_{21} de -32,2231 dB) e 3,3803 GHz (S_{21} de -38,2940 dB). Os valores de BW na polarização TE (vertical) foram de 0,93 GHz, 0,91 GHz e 0,93 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM (horizontal) os valores foram de 0,91 GHz, 0,87 GHz e 0,94 GHz, respectivamente para as mesmas posições.

Assim como foi observado para a FSS espira quadrada, foi verificado que o aumento no substrato da FSS gera um deslocamento na frequência do dispositivo para abaixo da frequência de ressonância do dispositivo padrão de referência, em ambas as polarizações TE (vertical) e TM (horizontal), tanto observando os valores simulados quanto os valores obtidos nas medições experimentais. Considerando a inserção de malhas/redes inspiradas em EBG tem-se o comportamento bem parecido ao observado nas simulações, onde as malhas/redes que apresentam os furos na posição final (F) possuem as frequências de ressonância mais baixas, assim como para a FSS espira quadrada. Nas posições de meio (M) e de dupla camada (D) as frequências tendem a ser maiores, se aproximando da frequência de ressonância do dispositivo padrão. Considerando o aumento nos diâmetros dos furos, a frequência de ressonância do dispositivo também tende a aumentar, novamente em ambas as polarizações TE (vertical) e TM (horizontal). Verificando os valores de largura de banda, estes também

tendem a aumentar a medida que os diâmetros dos furos vão aumentando, porém sem conseguir chegar nos valores observados para os dispositivos padrão, também em ambas as polarizações consideradas.

Os resultados das respostas em frequência contendo os parâmetros de frequência de ressonância (f_r), coeficiente de transmissão (S_{21}) e largura de banda (BW) obtidos nas medições experimentais realizadas através do *setup* de medição e já descritos anteriormente para a FSS anel circular de referência, anel de substrato triplicado e as demais configurações propostas incluindo as malhas/redes inspiradas em EBG e as suas respectivas variações na posição dos furos estão contidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados experimentais medidos das respostas em frequência da FSS anel circular de referência, anel de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.

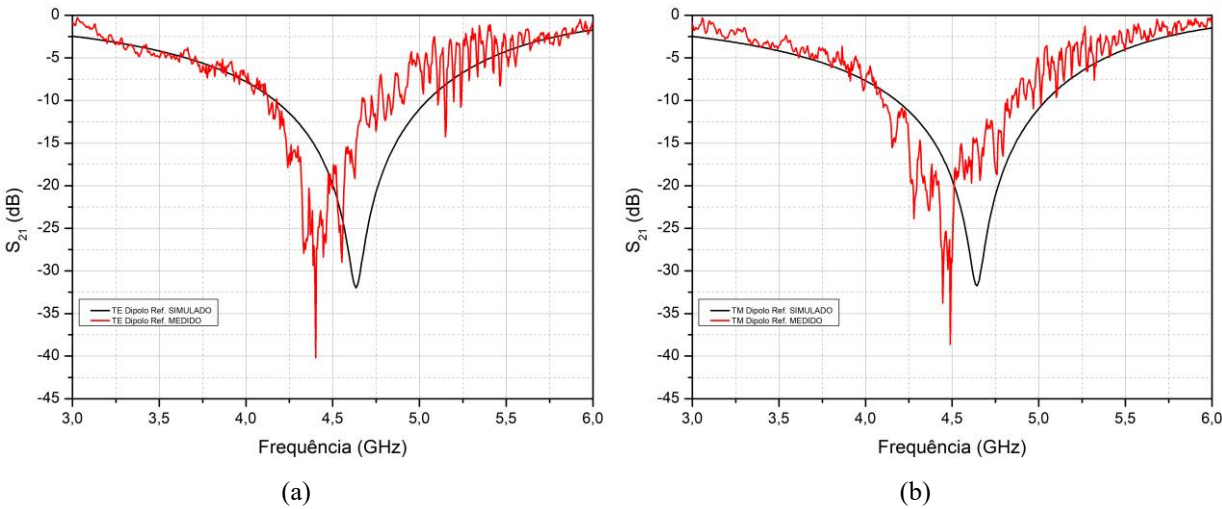
Estrutura	Frequência (GHz)		S_{21} (dB)		BW (GHz)	
	TE	TM	TE	TM	TE	TM
FSS anel circular referência	3,3900	3,4633	-24,4060	-35,1379	1,17	1,19
FSS substrato triplicado	3,2092	3,2678	-38,7950	-38,2619	0,91	0,92
FSS EBG 3mm – M	3,3216	3,2678	-41,3490	-25,5063	0,94	0,95
FSS EBG 3mm – F	3,2336	3,2630	-37,9660	-44,6693	0,89	0,95
FSS EBG 3mm – D	3,2434	3,3851	-35,8932	-25,6023	1,04	0,93
FSS EBG 4mm – M	3,3363	3,2630	-34,7532	-33,5221	0,99	0,87
FSS EBG 4mm – F	3,1799	3,2776	-42,3263	-31,1580	0,96	0,90
FSS EBG 4mm – D	3,3118	3,2483	-36,9989	-26,2543	1,01	0,93
FSS EBG 5mm – M	3,3216	3,4194	-39,2936	-25,3571	0,93	0,91

FSS EBG 5mm – F	3,2727	3,2581	-32,7154	-32,2231	0,91	0,87
FSS EBG 5mm – D	3,3949	3,3803	-40,4252	-38,2940	0,93	0,94

Fonte: Autoria própria, 2025.

Concluído os estudos envolvendo a análise da FSS anel circular e todas as respectivas variações observadas neste trabalho, seguiu-se com a análise da FSS dipolo cruzado para todas as mudanças propostas. Na Figura 89 é possível verificar o comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS dipolo cruzado de referência, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

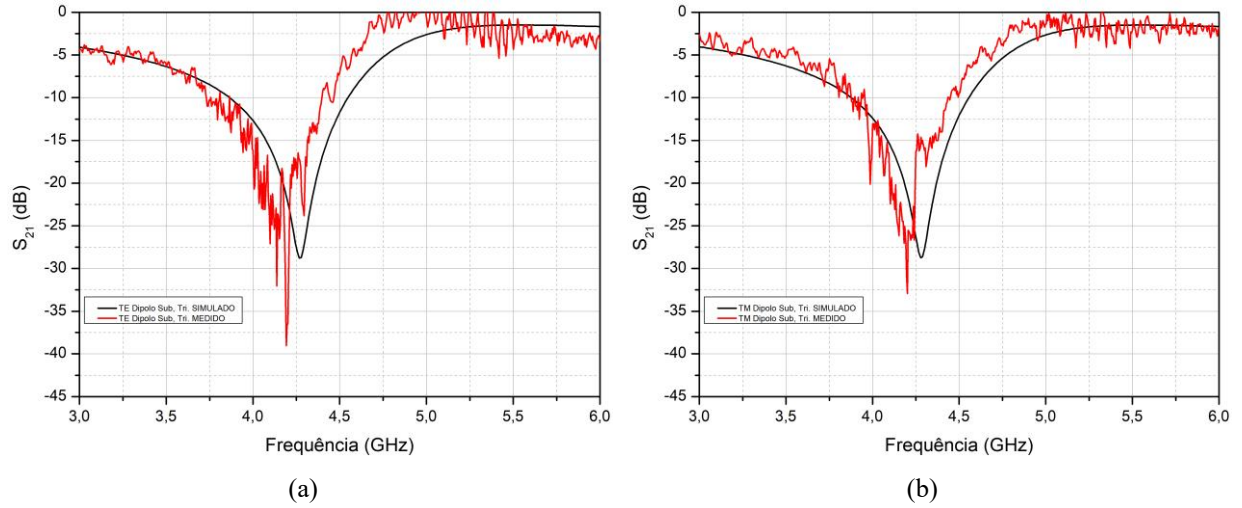
Figura 89 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado de referência para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Na Figura 90 é mostrado o comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS dipolo cruzado com substrato triplicado, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), respectivamente. É observado o coeficiente de transmissão (S_{21}), bem como os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

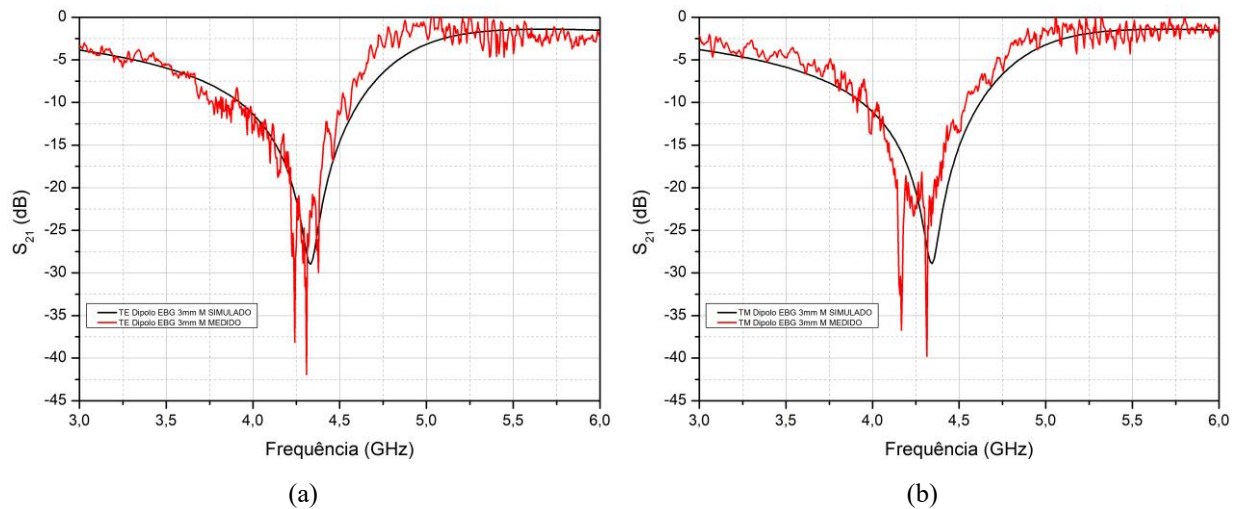
Figura 90 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com substrato triplicado para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

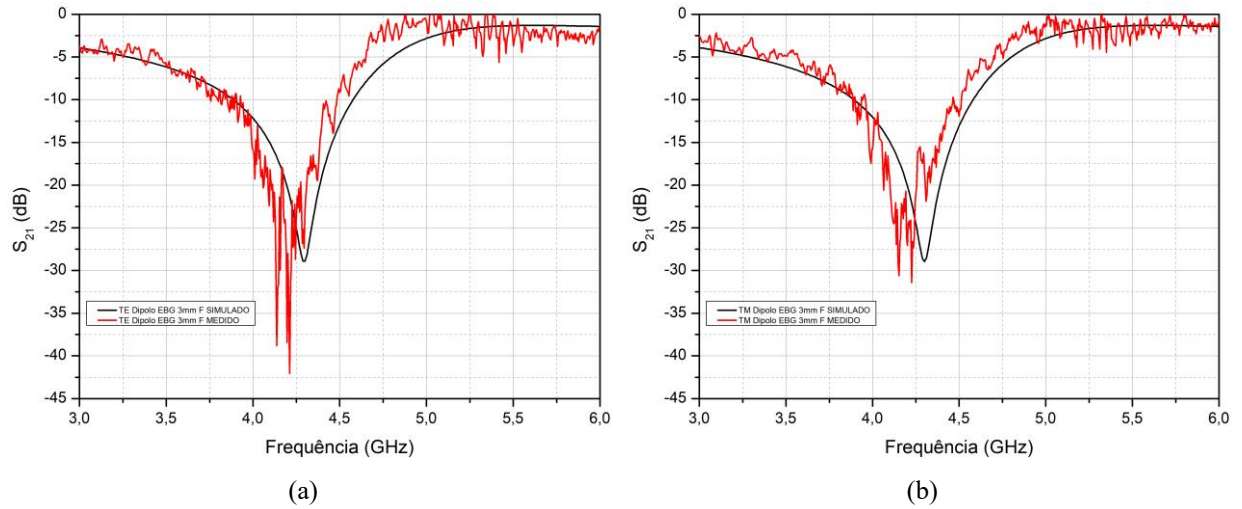
Nas Figuras 91, 92 e 93, é possível observar o comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal), com os furos na posição do meio (M), na posição final (F) e de dupla camada (D), respectivamente. São observados os valores de coeficiente de transmissão (S_{21}), os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 91 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



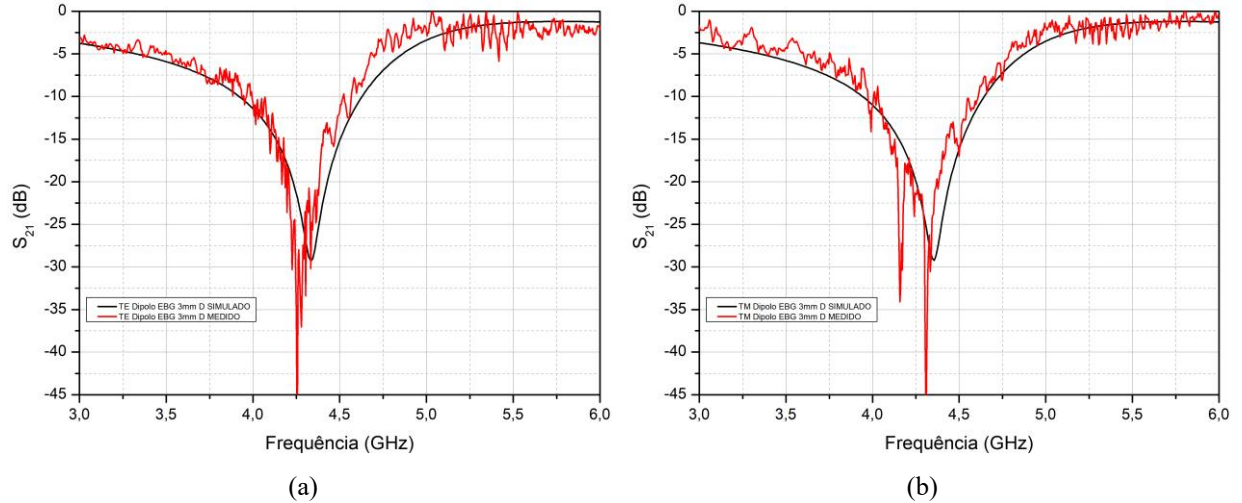
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 92 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 93 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 3mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.

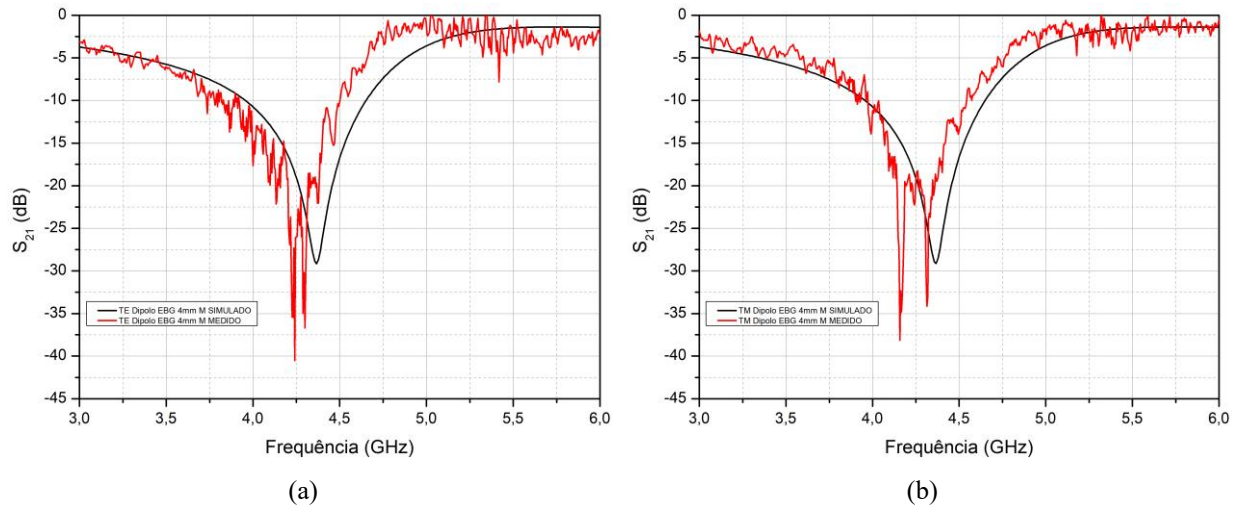


Fonte: Autoria própria, 2025.

Considerando neste ponto a análise do comportamento da resposta em frequência simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal). As Figuras 94, 95 e 96, permitem visualizar as respostas considerando os furos na posição do meio (M), na posição final (F) e de dupla camada (D),

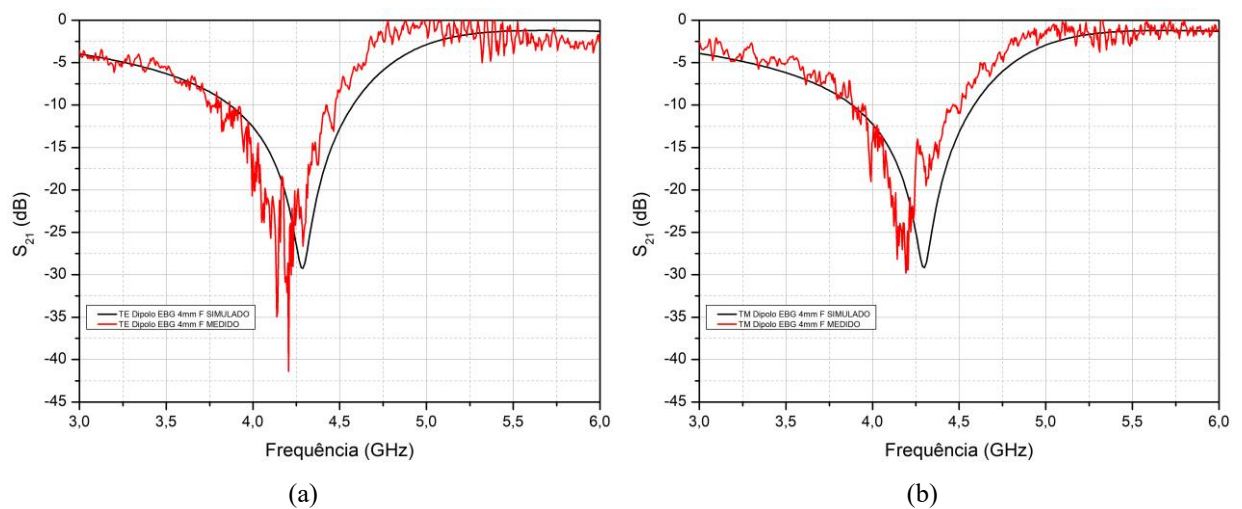
respectivamente. São observados os valores de coeficiente de transmissão (S_{21}), os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 94 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



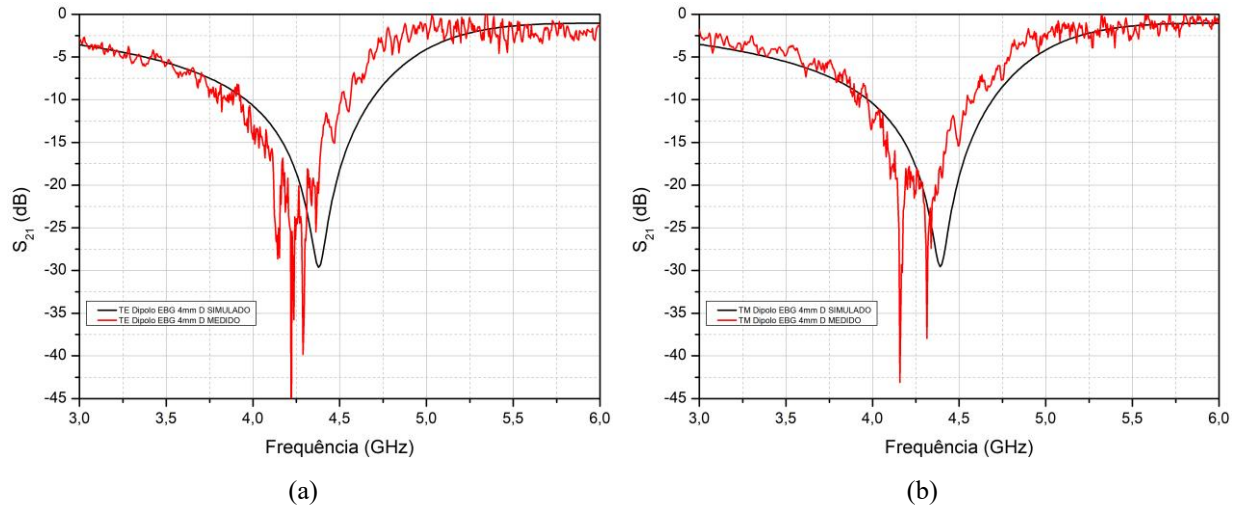
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 95 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

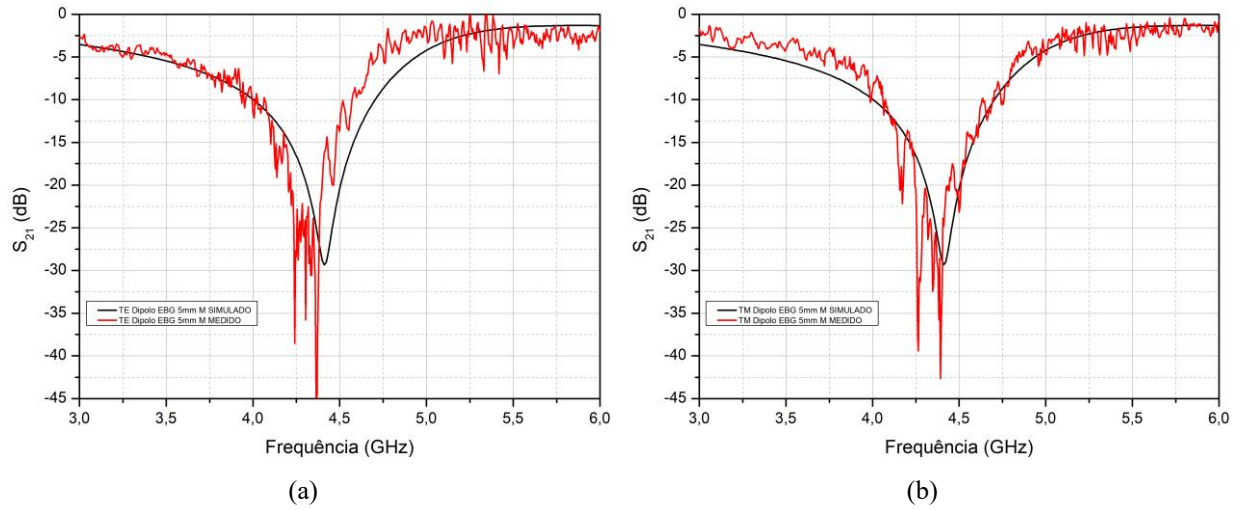
Figura 96 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 4mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

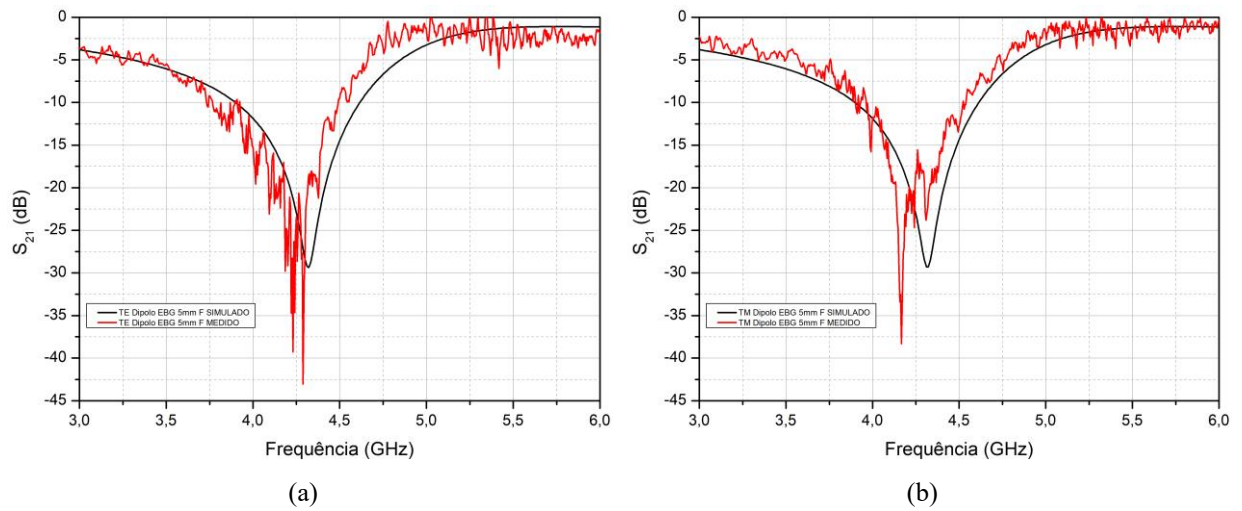
Para finalizar o estudo envolvendo a FSS dipolo cruzado, foi realizado o estudo do comportamento da resposta em frequência simulado e medido considerando a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, tanto para a polarização TE (vertical) quanto para a polarização TM (horizontal). As Figuras 97, 98 e 99, mostram as respostas considerando os furos na posição do meio (M), na posição final (F) e de dupla camada (D), respectivamente. São observados os valores de coeficiente de transmissão (S_{21}), os valores de frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW).

Figura 97 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição do meio (M) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



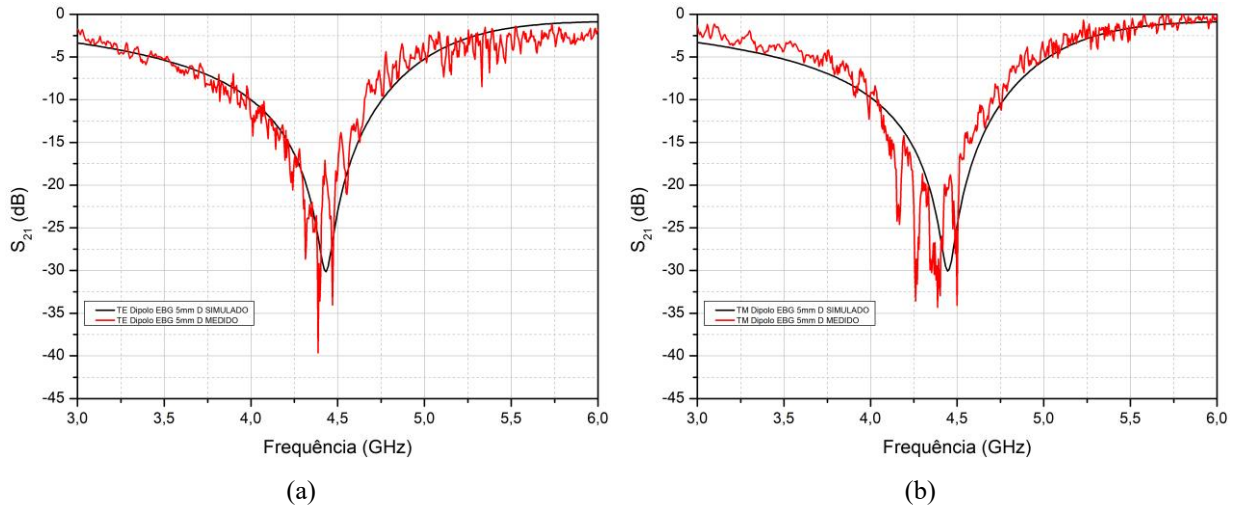
Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 98 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição final (F) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 99 – Coeficiente de transmissão (S_{21}) simulado e medido da FSS dipolo cruzado com a inserção de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG com diâmetro dos furos de 5mm, na posição dupla camada (D) para (a) Polarização TE e (b) Polarização TM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Para os gráficos apresentados que relacionam os dados simulados com os dados obtidos nas medições experimentais para o caso da FSS dipolo cruzado, verificou-se que o comportamento da resposta em frequência para os dados medidos se mostrou semelhante ao comportamento das simulações, assim como para o caso das demais FSS analisadas anteriormente, tanto para polarização TE (vertical) como para polarização TM (horizontal).

O dipolo cruzado de referência apresentou um valor experimental medido para o coeficiente de transmissão (S_{21}) de -30,8794 dB na frequência de ressonância (f_r) de 4,3969 GHz na polarização TE (vertical), além de uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 0,73 GHz. Para a polarização TM (horizontal), a espira quadrada de referência apresentou um valor experimental medido S_{21} de -30,1956 dB na frequência f_r de 4,4848 GHz, com uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 0,76 GHz.

Para a FSS dipolo cruzado com substrato triplicado verificou-se um valor experimental medido para o coeficiente de transmissão (S_{21}) de -34,5745 dB na frequência de ressonância (f_r) de 4,1965 GHz na polarização TE (vertical), além de uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 0,72 GHz. Para a polarização TM (horizontal), a espira quadrada de referência apresentou um valor experimental medido S_{21} de -28,5962 dB na frequência f_r de 4,1916 GHz, com uma largura de banda (BW) para valores abaixo de -10 dB de 0,58 GHz. Novamente, o aumento na altura do substrato gera um deslocamento na frequência de ressonância para abaixo da f_r da estrutura FSS padrão, além do estreitamento na largura de banda, confirmando assim os resultados obtidos nas simulações associando ao comportamento observado nos resultados experimentais medidos.

Analisando e observando as respostas em frequência das malhas/redes inspiradas em EBG para o dipolo cruzado, considerando o diâmetro dos furos de 3mm e as respectivas posições propostas e a sequência já definida anteriormente (posição do meio (M), posição final (F) e posição dupla camada (D)), chegou-se nos seguintes valores respectivos sendo para f_r de 4,2991 GHz (S_{21} de -31,5201 dB), 4,2063 GHz (S_{21} de -34,5085 dB) e 4,2649 GHz (S_{21} de -35,3143 dB), considerando polarização TE (vertical). Em polarização TM (horizontal) verificou-se os seguintes valores respectivos nas posições supracitadas, sendo para f_r de 4,1623 GHz (S_{21} de -32,5164 dB), 4,1476 GHz (S_{21} de -27,2797 dB) e 4,3138 GHz (S_{21} de -36,8743 dB). Os valores de BW na polarização TE (vertical) foram de 0,67 GHz, 0,64 GHz e 0,63 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM (horizontal) os valores foram de 0,63 GHz, 0,63 GHz e 0,64 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente.

Para o diâmetro dos furos das malhas/redes inspiradas em EBG de 4mm e a mesma sequência adotada anteriormente para as posições dos furos, foram obtidos os seguintes valores para f_r de 4,2307 GHz (S_{21} de -33,6270 dB), 4,1965 GHz (S_{21} de -32,6504 dB) e 4,2258 GHz (S_{21} de -34,0894 dB), considerando polarização TE (vertical). Os valores obtidos em polarização TM (horizontal) foram de f_r de 4,1672 GHz (S_{21} de -33,4407 dB), 4,1965 GHz (S_{21} de -28,0129 dB) e 4,1623 GHz (S_{21} de -32,9775 dB). Os valores de BW na polarização TE (vertical) foram de 0,68 GHz, 0,69 GHz e 0,67 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM (horizontal) os valores foram de 0,61 GHz, 0,64 GHz e 0,65 GHz, respectivamente para as mesmas posições.

Finalmente considerando a última mudança no diâmetro dos furos para a análise da FSS dipolo cruzado, verificou-se o caso do diâmetro dos furos das malhas/redes inspiradas em EBG de 5mm, na mesma sequência para a posição dos furos adotada anteriormente, foram obtidos os seguintes valores para f_r de 4,3675 GHz (S_{21} de -38,5952 dB), 4,2307 GHz (S_{21} de -32,6487 dB) e 4,3920 GHz (S_{21} de -32,4110 dB), considerando polarização TE (vertical). Os valores obtidos em polarização TM (horizontal) foram de f_r de 4,3920 GHz (S_{21} de -34,8769 dB), 4,1623 GHz (S_{21} de -33,3366 dB) e 4,3920 GHz (S_{21} de -31,3973 dB). Os valores de BW na polarização TE (vertical) foram de 0,62 GHz, 0,72 GHz e 0,69 GHz, para as posições M, F e D, respectivamente. Para a polarização TM (horizontal) os valores foram de 0,64 GHz, 0,63 GHz e 0,70 GHz, respectivamente para as mesmas posições.

Seguindo o mesmo padrão de comportamento observado para a FSS espira quadrada e FSS anel circular, foi visto para a FSS dipolo cruzado que o aumento no substrato gera um

deslocamento na frequência do dispositivo para abaixo da frequência de ressonância do dispositivo padrão de referência, em ambas as polarizações TE (vertical) e TM (horizontal), mesmo verificando os valores simulados ou ainda os valores obtidos nas medições experimentais. Considerando a inserção de malhas/redes inspiradas em EBG tem-se o comportamento bem próximo ao observado nas simulações, onde as malhas/redes que apresentam os furos na posição final (F) possuem as frequências de ressonância mais baixas, assim como para as FSS anteriormente analisadas. Nas posições de meio (M) e de dupla camada (D) as frequências tendem a ser maiores, se aproximando da frequência de ressonância do dispositivo padrão. Considerando o aumento nos diâmetros dos furos, a frequência de ressonância do dispositivo também tende a aumentar, novamente em ambas as polarizações TE (vertical) e TM (horizontal). Verificando os valores de largura de banda, estes também tendem a aumentar à medida que os diâmetros dos furos vão aumentando, porém sem conseguir chegar nos valores observados para os dispositivos padrão, também em ambas as polarizações consideradas.

Os resultados das respostas em frequência contendo os parâmetros de frequência de ressonância (f_r), coeficiente de transmissão (S_{21}) e largura de banda (BW) obtidos nas medições experimentais realizadas através do *setup* de medição e já descritos anteriormente para a FSS dipolo cruzado de referência, dipolo de substrato triplicado e as demais configurações propostas incluindo as malhas/redes inspiradas em EBG e as suas respectivas variações na posição dos furos estão contidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados experimentais medidos das respostas em frequência da FSS dipolo cruzado de referência, dipolo de substrato triplicado e as demais configurações propostas com malhas/redes inspiradas em EBG.

Estrutura	Frequência (GHz)		S_{21} (dB)		BW (GHz)	
	TE	TM	TE	TM	TE	TM
FSS dipolo cruzado referência	4,3969	4,4848	-30,8794	-30,1956	0,73	0,76
FSS substrato triplicado	4,1965	4,1916	-34,5745	-28,5962	0,72	0,58
FSS EBG 3mm – M	4,2991	4,1623	-31,5201	-32,5164	0,67	0,63

FSS EBG 3mm – F	4,2063	4,1476	-34,5085	-27,2797	0,64	0,63
FSS EBG 3mm – D	4,2649	4,3138	-35,3143	-36,8743	0,63	0,64
FSS EBG 4mm – M	4,2307	4,1672	-33,6270	-33,4407	0,68	0,61
FSS EBG 4mm – F	4,1965	4,1965	-32,6504	-28,0129	0,69	0,64
FSS EBG 4mm – D	4,2258	4,1623	-34,0894	-32,9775	0,67	0,65
FSS EBG 5mm – M	4,3675	4,3920	-38,5952	-34,8769	0,62	0,64
FSS EBG 5mm – F	4,2307	4,1623	-32,6487	-33,3366	0,72	0,63
FSS EBG 5mm – D	4,3920	4,3920	-32,4110	-31,3973	0,69	0,70

Fonte: Autoria própria, 2025.

Para fins de uma melhor verificação, análise e estudo comparativo entre todos os valores observados nas simulações e nas medições experimentais considerando todas as estruturas FSS e suas respectivas variações propostas neste trabalho, a Tabela 8 mostra todos os dados obtidos nos estudos realizados.

Tabela 8 – Todos os resultados simulados e medidos das respostas em frequência das FSS e duas diversas configurações propostas neste trabalho.

Estrutura	Frequência (GHz)		Frequência (GHz)		S ₂₁ (dB)		S ₂₁ (dB)		BW (GHz)		BW (GHz)	
	Simulado		Medido		Simulado		Medido		Simulado		Medido	
	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM	TE	TM
FSS espira quadrada referência	3,5667	3,5667	3,3900	3,5318	-42,8879	-42,3364	-26,5455	-49,7157	2,15	2,01	1,39	1,45
FSS substrato triplicado	3,2000	3,2000	3,1554	3,1408	-39,4091	-39,1411	-27,1050	-38,6703	1,58	1,55	1,00	1,10
FSS EBG 3mm – M	3,2222	3,2222	3,2092	3,2043	-38,6331	-38,5541	-29,0700	-41,3761	1,46	1,45	1,08	1,39
FSS EBG 3mm – F	3,2000	3,2000	3,1554	3,3021	-38,7303	-38,5911	-29,3480	-33,8550	1,48	1,46	1,09	1,22
FSS EBG 3mm – D	3,2333	3,2333	3,3363	3,3021	-38,9178	-38,8543	-35,0577	-33,2100	1,50	1,48	1,14	1,30
FSS EBG 4mm – M	3,2444	3,2444	3,4194	3,1896	-38,8983	-38,8704	-32,6759	-39,1901	1,49	1,49	1,11	1,30
FSS EBG 4mm – F	3,2111	3,2000	3,2190	3,1310	-38,7947	-38,7382	-35,4765	-40,9896	1,49	1,49	1,13	1,21
FSS EBG 4mm – D	3,2667	3,2667	3,1945	3,4194	-39,1181	-38,9840	-29,4333	-32,2321	1,52	1,52	1,12	1,29
FSS EBG 5mm – M	3,2889	3,2778	3,3167	3,4096	-38,8463	-38,7794	-41,0787	-37,0620	1,50	1,48	1,19	1,29
FSS EBG 5mm – F	3,2222	3,2111	3,1310	3,2630	-38,9754	-38,9604	-36,0119	-38,8199	1,51	1,49	1,07	1,16
FSS EBG 5mm – D	3,3111	3,3111	3,3069	3,3705	-38,4789	-39,4686	-36,6808	-28,5330	1,56	1,56	1,20	1,23
FSS anel circular referência	3,5444	3,5444	3,3900	3,4633	-38,1361	-38,0222	-24,4060	-35,1379	1,36	1,35	1,17	1,19

FSS substrato triplicado	3,2444	3,2222	3,2092	3,2678	-35,4922	-33,7591	-38,7950	-38,2619	1,10	1,04	0,91	0,92
FSS EBG 3mm – M	3,2667	3,2556	3,3216	3,2678	-35,7906	-35,7011	-41,3490	-25,5063	1,12	1,10	0,94	0,95
FSS EBG 3mm – F	3,2444	3,2444	3,2336	3,2630	-35,6918	-35,6696	-37,9660	-44,6693	1,11	1,10	0,89	0,95
FSS EBG 3mm – D	3,2667	3,2667	3,2434	3,3851	-35,7252	-35,8660	-35,8932	-25,6023	1,12	1,12	1,04	0,93
FSS EBG 4mm – M	3,2889	3,2778	3,3363	3,2630	-35,5731	-35,7010	-34,7532	-33,5221	1,10	1,09	0,99	0,87
FSS EBG 4mm – F	3,2556	3,2444	3,1799	3,2776	-35,7631	-35,8399	-42,3263	-31,1580	1,12	1,11	0,96	0,90
FSS EBG 4mm – D	3,3000	3,2889	3,3118	3,2483	-36,1118	-36,1520	-36,9989	-26,2543	1,15	1,14	1,01	0,93
FSS EBG 5mm – M	3,3111	3,3000	3,3216	3,4194	-35,9924	-35,8268	-39,2936	-25,3571	1,12	1,11	0,93	0,91
FSS EBG 5mm – F	3,2667	3,2667	3,2727	3,2581	-35,7972	-35,7910	-32,7154	-32,2231	1,11	1,11	0,91	0,87
FSS EBG 5mm – D	3,3333	3,3222	3,3949	3,3803	-36,3528	-36,4051	-40,4252	-38,2940	1,17	1,16	0,93	0,94
FSS dipolo cruzado referência	4,6333	4,6444	4,3969	4,4848	-31,9898	-31,7800	-30,8794	-30,1956	0,88	0,86	0,73	0,76
FSS substrato triplicado	4,2667	4,2778	4,1965	4,1916	-28,7803	-28,7330	-34,5745	-28,5962	0,68	0,68	0,72	0,58
FSS EBG 3mm – M	4,3333	4,3444	4,2991	4,1623	-28,9880	-28,9199	-31,5201	-32,5164	0,69	0,68	0,67	0,63
FSS EBG 3mm – F	4,3000	4,3000	4,2063	4,1476	-28,9098	-28,9675	-34,5085	-27,2797	0,69	0,68	0,64	0,63
FSS EBG 3mm – D	4,3333	4,3556	4,2649	4,3138	-29,3336	-29,2311	-35,3143	-36,8743	0,71	0,70	0,63	0,64

FSS EBG 4mm – M	4,3667	4,3667	4,2307	4,1672	-29,1608	-29,1352	-33,6270	-33,4407	0,69	0,69	0,68	0,61
FSS EBG 4mm – F	4,2889	4,3000	4,1965	4,1965	-29,2472	-29,1682	-32,6504	-28,0129	0,71	0,71	0,69	0,64
FSS EBG 4mm – D	4,3778	4,3889	4,2258	4,1623	-29,6403	-29,5422	-34,0894	-32,9775	0,72	0,72	0,67	0,65
FSS EBG 5mm – M	4,4111	4,4111	4,3675	4,3920	-29,3477	-29,3214	-38,5952	-34,8769	0,70	0,70	0,62	0,64
FSS EBG 5mm – F	4,3222	4,3222	4,2307	4,1623	-29,3692	-29,2994	-32,6487	-33,3366	0,72	0,71	0,72	0,63
FSS EBG 5mm – D	4,4333	4,4444	4,3920	4,3920	-30,1514	-30,0620	-32,4110	-31,3973	0,76	0,75	0,69	0,70

Fonte: Aatoria própria, 2025.

5 CONCLUSÕES

As análises e estudos realizados durante as simulações desenvolvidas e validadas através das correspondências e semelhanças entre estas e as medições experimentais realizadas com as estruturas devidamente confeccionadas, possibilitaram uma avaliação aprofundada da influência da variação da altura do substrato dielétrico e da aplicação de malhas/redes 3x3 inspiradas em EBG de formato quadrangular, com as variações dos diâmetros e posições de furos adotados neste trabalho, no comportamento da resposta em frequência das estruturas FSS do tipo espira quadrada, anel circular e dipolo cruzado, considerando incidência normal e polarizações TE (vertical) e TM (horizontal), para as respectivas características consideradas como padrão de referência.

De maneira geral, verificou-se que o aumento da altura do substrato dielétrico resultou em redução da frequência de ressonância (f_r) e estreitamento da largura de banda (BW) nas três tipologias de estruturas FSS estudadas. A introdução das malhas/redes inspiradas em EBG provocou alterações consideráveis nesses parâmetros, variando conforme o diâmetro e a posição dos furos. Entre as posições propostas e analisadas neste trabalho, considerando apenas as estruturas inspiradas em EBG, a de dupla camada (D) apresentou maior influência tanto no deslocamento da frequência de ressonância quanto na maior largura de banda, seguida pela posição no meio (M) e, por último, pela posição final (F), sendo que esta última posição apresentou uma influência bastante discreta, até mesmo para o maior diâmetro considerado. Mesmo com o aumento nos valores da frequência de ressonância e da largura de banda quando se considera a inserção de malhas/redes inspiradas em EBG, os valores ainda ficaram abaixo dos valores para as estruturas consideradas como padrão de referência, tornando o dispositivo mais seletivo e eficiente para esse propósito. Observou-se também tendência de aumento da frequência de ressonância à medida que o diâmetro dos furos aumentava, comportamento presente em todas as geometrias das FSS estudadas.

As análises da densidade superficial de corrente (J) evidenciaram padrões distintos de concentração de corrente para cada configuração observada, sendo que para as estruturas contendo as malhas/redes inspiradas em EBG verificou-se uma maior densidade de corrente ao longo de todas as bordas e cantos internos das estruturas, fazendo-se a comparação com as estruturas padrão de referência, sendo que a posição de maior concentração de corrente nas partes metálicas das FSS se deu em função do tipo de polarização observada, TE (vertical) ou

TM (horizontal), reforçando o impacto das modificações estruturais na distribuição eletromagnética das partes metálicas das FSS consideradas.

Os resultados obtidos para os parâmetros estudados nas simulações e validados nas medições experimentais, mesmo com pequenas variações provenientes de imperfeições no *setup* de medição e nas características existentes no processo, confirmam que a aplicação de estruturas inspiradas em EBG constitui uma alternativa viável para o ajuste fino das características de ressonância e de seletividade das estruturas FSS, permitindo adequar o projeto a diferentes aplicações de filtragem e controle de ondas eletromagnéticas.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Em virtude dos resultados e conclusões obtidos neste trabalho de investigação, recomenda-se para estudos futuros os seguintes pontos:

- Realizar análises semelhantes para estruturas FSS do tipo abertura (passa-faixa) e verificar o comportamento delas em ambiente simulado e experimental;
- Investigar outros padrões de malhas/redes inspiradas em EBG, incluindo outras geometrias e até mesmo arranjos assimétricos, para ampliar o controle sobre o comportamento da resposta em frequência;
- Analisar o comportamento angular das estruturas, avaliando o desempenho sob diferentes ângulos de incidência (estudo de estabilidade angular);
- Estudar a influência de diferentes materiais dielétricos e condutores, ou até mesmo considerar a dopagem dos espaços observados nos furos, buscando otimização de custo, desempenho e viabilidade de fabricação;
- Expandir a análise para bandas de frequência superiores com outros tipos de aplicação;
- Explorar a integração das FSS com outras tecnologias, como superfícies inteligentes e metamateriais, para aplicações multifuncionais.

REFERÊNCIAS

ABDOLLAHVAND, M. Dual-Band Single-Layer Frequency Selective Surface for Millimeter-Wave 5G Applications. **In: 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)**, Florence, Italy, 2023. p. 1-3.

AGRAWAL, V.; IMBRIALE, W. Design of a dichroic cassegrain subreflector. **IEEE Transactions on Antennas e Propagation**, v. 27, nº 4, p. 466–473, 1979.

ALENCAR, Marina de Oliveira. **Desenvolvimento de FSS com resposta passa-faixa baseada na geometria Matrioska**. 2020. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2020.

ALÉN-SAVIKKO, A. Network neutrality in the era of 5G – a matter of faith, hope, and design? **Information and Communications Technology Law, Taylor & Francis**, v. 28, n. 2, p. 115–130, 2019. ISSN 14698404.

ALMEIDA, J. F.; SOBRINHO, C. L. S. S. Influência do posicionamento de uma estrutura PBG sobre a largura de banda de uma antena de microfita. **IEEE Latin America Transactions**, Vol. 2, no. 1, 2004.

ALMEIDA, V. A. **Aplicação de Superfícies Seletivas em Frequência para Melhoria de Resposta de Arranjos de Antenas Planares**, Tese de Doutorado: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2014.

AL-NAMARI, M. A.; MANSOOR, A. M.; IDRIS, M. Y. I. A Brief Survey on 5G Wireless Mobile Network. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, v. 8, n. 11, p. 52–59, 2017. ISSN 2158107X. Citado na página 51.

ANDRADE, H. D. **Desenvolvimento de um Ressonador Retangular de Fenda com Múltiplas Camadas de Substrato e com Utilização de Material PBG para Sistema de Comunicação Sem Fio**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN; Natal, 2013.

ANDREWS, J. G.; BUZZI, S.; CHOI, W.; HANLY, S. V.; LOZANO, A.; SOONG, A. C.; ZHANG, J. C. What will 5G be? **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, IEEE, v. 32, n. 6, p. 1065–1082, 2014. ISSN 07338716.

ANWAR, Rana Sadaf; MAO, Lingfeng; NING, Huansheng. Frequency Selective Surfaces: A Review. **Applied Sciences**, v. 8, n. 9, p. 1689, 2018.

AVINASH, K. R.; RUKMINI, T. S. Design and performance analysis of EBG antenna for wireless applications. **IEEE Applied Electromagnetic Conference and IEEE Antenna Week**, Volume 978-1- 4577-1099-5, 2011.

BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3 ed. New Jersey, United States: John Wiley & Sons. p. 1073. 2005.

BALBI, R.B.M., **Fundamentos físicos e matemáticos dos materiais elétricos**, 1ª Edição, Editora Universitária UFPA, pp. 130-133, 1998.

CAMPOS, A. L. P. de S. **Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e projeto**. 1. ed. Natal, Rio Grande do Norte: IFRN, 2008. 198 p. v. 1.

CAMPOS, A.L.P. de S.; MANIÇOBA, R.H.C.; D'ASSUNÇÃO, A.G. Investigation of enhancement band using double screen frequency selective surfaces with koch fractal geometry at millimeter wave range. **J. Infrared Millim. Terahertz Waves** **2010**, 31, 1503–1511. [CrossRef]

CARDOSO, Marcos Vaz. **Síntese de filtros rejeita-faixa de micro-ondas de banda larga e dupla-banda empregando estruturas periódicas EBG**. 2012. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação PSI do Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

CAVALCANTI FILHO, Pedro Henrique Bezerra. **FSS fractal baseada na geometria curva de Sierpinski para aplicações em sistemas de radar**. 2018. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

CAZO, R. M. **Sistemas Interrogadores de Sensores Baseados em Grade de Bragg**. São José dos campos. Instituto Tecnológico de Aeronautica (ITA), 2001.

CHAVES, Tiago Rodrigues. **5G – Redes móveis de quinta geração e o princípio da neutralidade de rede**. 2021. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Informação e Gestão do Conhecimento. Fundação Mineira de Educação e Cultura. Belo Horizonte, 2021.

COSTA, F.; MONORCHIO, A.; MANARA, G. Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces. **IEEE Trans. Antennas Propag.** 2010, 58, 1551–1558. [CrossRef]

DANGI, R.; LALWANI, P.; CHOUDHARY, G.; YOU, I.; PAU, G. **Study and Investigation on 5G Technology: A Systematic Review. Sensors**, 22(1), 26. 2022.

DAVIDSON, D. B. Computational electromagnetics for RF and microwave engineering. **USA: Cambridge University Press.**, 2005.

DEWANI, A. A.; O'KEEFE, S. G.; THIEL, D. V., GALEHDAR, A. Window RF Shielding Film Using Printed FSS. **IEEE Trans Antennas Propag**, vol. 66, no. 2, pp. 790–796, Feb. 2018, doi: 10.1109/TAP.2017.2780893.

DIAS, M. B. S. et al. Influence of the 2-D PBG crystal parameters on its bandgaps. **International Conference on Microwave and Optoelectronics**, 2005., [s.l.], v. 1, n. 8995847, p.448-451, 25 jul. 2005, IEEE.

DUAN, Z.; ABOMAKHLEB, G.; LU, G. Perforated Medium Applied in Frequency Selective Surfaces and Curved Antenna Radome. **Applied Sciences**. 9. 1081. 2019. DOI: 10.3390/app9061081.

DUARTE, Mychael Jales. **Análise e Projeto de Estruturas Ultraminiaturizadas de FSS para Aplicações em Sistemas de Sensoriamento de Temperatura**. 2023. 88 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

EMHEMMED, Adel Saad; JERBI, Luojen S; AHMED, Nuredin Ali. Modeling and Design of Reconfigurable Multi-Band Frequency Selective Surface. **In: IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)**, 2021.

FERREIRA, Hillner de Paiva Almeida. **Matrioska: uma proposta de geometria para FSS multibandas**. 2014. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. João Pessoa, 2014.

GOMES NETO, Alfredo et al. Modeling the Resonant Behavior of Continuously Reconfigurable FSS Based on Four Arms Star Geometry. **Journal Of Microwaves, Optoelectronics And Electromagnetic Applications**, [S.L.], v. 19, n. 3, p. 415-427, set. 2020.

GUPTA, R.; KUMAR, M. Bandwidth enhancement of microstrip patch antennas using electromagnetic bandgap (EBG) structures with square and circular unit cells. **International Conference on Communication and Electronics System Design**, Vol. 8760, pp. 1-7, 2013.

HAJLAOUI, El Amjed; TRABELSI, Hichem. Improvement of Circularly Polarized SlotPatch Antenna Parameters by Using Electromagnetic Band Gap Structures. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, [S.L.], Vol. 15, No. 4, December 2016.

HEINRICHS, M.; KRONBERGER, R. Digitally Tunable Frequency Selective Surface for a Physical Layer Security System in the 5 GHz *Wi-Fi* Band. 2020. **International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)**, Osaka, Japan, 2021, pp. 267-268, doi: 10.23919/ISAP47053.2021.9391243.

JAYAKRISHNAN, V. M.; LIYA, M. L. A survey on frequency selective surfaces in em field. **In: Proceedings of the 3rd International Conference on Smart Systems and Inventive Technology**, ICSSIT 2020. Aug. 2020. p. 671–675.

JOANNOPOULOS, S. J.; JOHN, D. Photonic Cristal - Modeling the flow of light. **Second Edition: Princeton University Press**. 2007.

JOHNSON, S.G. and JOANNOPOULOS, J.D., Introduction to photonic crystals: Bloch's theorem, band diagrams, and gaps (but no defects), **MIT**, 2003.

KUMAR, A.; REDDY, G. S.; P. J. Highly Angular-Stable Optically Transparent Microwave Absorber With Wide Absorption Bandwidth. **IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications**, vol. 4, no. 4, pp. 114–119, Dec. 2022, doi: 10.1109/LEMCPA.2022.3210020.

LEE, C. K.; LANGLEY, R. J. **Equivalent circuit models for frequency selective surfaces at oblique angles of incidence**, IEE Proceedings, 132 (6), 395 – 399 (1985).

LEE, Shung-Wu; ZARRILLO, G.; LAW, Chak-Lam. Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates. **IEEE Transactions On Antennas And Propagation**, [S.L.], v. 30, n. 5, p. 904-909, set. 1982. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tap.1982.1142923>.

LIMA, José Filipe de. **Estudo das propriedades eletromagnéticas de materiais vítreos para desenvolvimento de superfície seletiva em frequência com substrato de vidro para aplicação em comunicação indoor**. 2021. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal Rural do Semi Árido, Mossoró, 2021.

LIU, Bing; NIE, Zai-Ping; TAN, Jun. Study of finite planar frequency selective surfaces based on Babinet principle, 2016. **Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)**, Shanghai, 2016, pp. 4137-4141, doi: 10.1109/PIERS.2016.7735553.

MAIA, Anamaria Sena. **Estudo do comportamento dos parâmetros de antenas de microfita utilizando diferentes configurações de arranjos de estruturas EBG/PBG**. 2016. 172 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Mossoró, 2016.

MERZAKI, F. et al. A Compact Absorbing FSS Structure for Antenna Decoupling in the 5G 3.5GHz Band. **International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE**, Rome, Italy, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245649.

MILLIGAN, Thomas A. **Modern Antenna Design**. 2 ed. United States of America: John Wiley & Sons. p. 614. 2005.

MITTRA, R.; CHAN, C. H.; CWIK, T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces – a review. **IEEE Proceedings**, v. 76, nº 12, p. 1593–1615, 1988.

MOURA, Leidiane Carolina Martins de. **Caracterização de FSS com geometria estrela de quatro braços**. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2015.

MUKHERJEE, B. A novel sierpinski carpet fractal based photonic band gap structure for THz and optical communication applications”. 2015. **2nd International Conference on Signal**

Processing and Integrated Networks (spin), [s. l.], v. 1, n. 15077234, p.228-231, fev. 2015. IEEE.

MUNK, Ben A. **Frequency Selective Surfaces: Theory and Design**. 3 ed. New York, United States: Wiley-Blackwell, 2000. 440 p. ISBN 978-0471370475.

NÓBREGA, C. L. **Análise de Superfícies Seletivas de Frequência com Elementos Préfractais para Aplicações em Comunicações Indoor**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

PAIK, H.; PAIK, S.; RAGHAV, B. S.; BABU, J. R. A Single Layer Frequency Selective Surface based EM Shield for 4G and 5G Communications. **International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)**, Bangalore, India, 2022, pp. 1-4, DOI: 10.1109/SMARTGENCON56628.2022.10084324.

PEREIRA, João Pedro Carvalhosa. **A nova tecnologia 5G e a cibersegurança: percepção dos impactos nas organizações e dos desafios para os auditores**. 2022. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior de Contabilidade e Administração de Lisboa. Lisboa, 2022.

POZAR, David M. **Microwave Engineering**. 4ª ed. United States of America: John Wiley & Sons, p. 756. 2012.

QASEM, Nidal. **Enhancing Wireless Communication System Performance Through Modified Indoor Environments**. 2012. 198 f. Tese (Doutorado) - Curso de Electronic, Electrical And Systems Engineering, Loughborough University, [S.L.], 2012. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/288378804.pdf>. Acesso em: 30 maio 2024.

QUALCOMM. **As 5G launches globally, what comes next?** 2019. Disponível em: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2019/09/5g-launches-globally-what-comes-next>. Acesso em: 21 maio 2021.

RADISIC, V. et al. Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines. **IEEE Microw. Guid. Wave Lett.**, [s.l.], v. 8, n. 2, p.69-71, 1998. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/75.658644>. Disponível em: . Acesso em: 20 maio 2015.

RAVI, P. R.; K, S. T. RCS Reduction Techniques: A Comparative Review. **2023 Annual International Conference on Emerging Research Areas: International Conference on Intelligent Systems (AICERA/ICIS)**, Kanjirapally, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/AICERA/ICIS59538.2023.10420161.

Recommendation ITU-R M.2083. **IMT Vision Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond**. [S.l.], 2015.

SADIKU, Matthew N. O. **Elements of Electromagnetics**. 3 ed. England: Oxford University Press. p. 896. 2014.

SHANKARANARAYANAN, N. K.; GHOSH, A. **5G**. **IEEE Internet Computing**, v. 21, n. 5, p. 8–10, 2017. ISSN 1941-0131 VO - 21.

SILVA FILHO, Hawson Virgílio Honorário e. **Superfície Seletiva em Frequência multibanda baseada na geometria Cruz de Jerusalém**. 2018. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2018.

SILVA, José Lucas da. **Implementação de Estruturas EBG em Antenas de Microfitas e Polarização Linear-Circular com Metasuperfície para WLAN**. 2018. 97 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

SOBRINHO, Francisco Magno Monteiro. **Estudo da aplicação de estruturas quase-periódicas em antenas de microfita baseada na simetria de Penrose**. 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Mossoró, 2018.

SOUSA, Thayuan Rolim de. **Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequência baseadas na geometria Matrioska independente da polarização**. 2019. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2019.

VARDAXOGLU, J. C. **Frequency Selective Surfaces - Analysis and Design**, England: Research Studies Press, 1997.

WEI, P. S.; CHIU, C. N.; CHOU, C. C.; WU, T. L. Miniaturized Dual-Band FSS Suitable for Curved Surface Application. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, vol. 19, no. 12, pp. 2265-2269, Dec. 2020. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3029820.

WU, T. K., ed., **Frequency Selective Surface and Grid Array**, Wiley, New York, 1995.

YABLONOVITCH, E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and Electronics. **Phys Ver Lett** **58**, 2059-2062, 1987.

YABLONOVITCH, E. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms. **Physical Review Letters**, 2295–2298, 1991.

YANG, Y. D. H; ALEXOPOULOS, N. G.; YABLONOVITCH, E. Photonic band-gap materials for high-gain printed circuit antennas. **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, vol. AP-45, no. 1, 1997.

YANG, Y. H; ALEXOPOULOS, N. G. Gain enhancement methods for printed circuit antennas through multiple superstrates. **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, vol. AP 35, pp. 860-863, 1987.

YU, Y. M.; CHIU, C. N.; CHIOU, Y. P.; Wu, T. L. Suppression of end-fired emission for a miniaturized-element frequency-selective shielding surface with finite size using EBG. 2015. **IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)**, Dresden, Germany, 2015, pp. 50-55, doi: 10.1109/ISEMC.2015.7256131.

ZARRILO, G.; AGUIAR, K. Closed-Form low frequency solutions for electromagnetic waves through a frequency selective surface. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 35 (12), 1406 – 1417 (1987).