UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JULIETE DA SILVA SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UM ABSORVEDOR INSPIRADO NA FORMA DE OXALIS TETRAPHYLLA UTILIZANDO METASSUPERFÍCIE E SUPERFÍCIE SELETIVA EM FREQUÊNCIA

CAMPINA GRANDE - PB
2025

JULIETE DA SILVA SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UM ABSORVEDOR INSPIRADO NA FORMA DE OXALIS TETRAPHYLLA UTILIZANDO METASSUPERFÍCIE E SUPERFÍCIE SELETIVA EM FREQUÊNCIA

Tese de Doutorado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutora em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:

Processamento da Informação

Orientadores:

Prof. Dr. Alexandre Jean René Serres

Prof. Dr. Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos

CAMPINA GRANDE - PB

2025

S729d Souza, Juliete da Silva.

Desenvolvimento de um absorvedor inspirado na forma de *Oxalis tetraphylla* utilizando metassuperfície e superfície seletiva em frequência / Juliete da Silva Souza. – Campina Grande, 2025.

135 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2025.

"Orientação: Prof. Dr. Alexandre Jean René Serres, Prof. Dr. Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos".

Referências.

1. Absorvedor Baseado em Metamaterial. 2. Superfície Seletiva em Frequência (FSS). 3. Frequências Próximas. 4. *Oxalis tetraphylla.* I. Serres, Alexandre Jean René. II. Campos, Antônio Luiz Pereira de Siqueira. III. Título.

CDU 621.3(043.2)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA MEIRE EMANUELA DA SILVA MELO CRB-15/568

DESENVOLVIMENTO DE UM ABSORVEDOR INSPIRADO NA FORMA DE OXALIS TETRAPHYLLA UTILIZANDO METASSUPERFÍCIE E SUPERFÍCIE SELETIVA EM FREQUÊNCIA

JULIETE DA SILVA SOUZA

TESE APROVADA EM 11 / 06 / 2025

Alexandre Jean René Serres, D.Sc., UFCG
Orientador

Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos, D.Sc., UFRN
Orientador

Francisco Marcos de Assis, D.Sc., UFCG
Examinador

Wamberto José Lira de Queiroz, D.Sc., UFCG
Examinador

Alfredo Gomes Neto, D.Sc., IFPB
Examinador

Maurício Weber Benjó Da Silva, D.Sc., UFF
Examinador

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1 - ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS, NO DOMÍNIO DA ENGENHARIA ELÉTRICA, REALIZADA EM 12 DE JUNHO DE 2025
(Nº 397)

CANDIDATO(A): **JULIETE DA SILVA SOUZA .** COMISSÃO EXAMINADORA: FRANCISCO MARCOS DE ASSIS, Dr., UFCG - Presidente da Comissão e Examinador Interno, ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, D.Sc., UFCG - Orientador, ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA CAMPOS, D.Sc., UFRN -Orientador, WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc., UFCG - Examinador Interno, ALFREDO GOMES NETO, D.Sc., IFPB - Examinador Externo, MAURÍCIO WEBER BENJÓ DA SILVA , D.Sc., UFF - Examinador Externo. TÍTULO DA TESE: Desenvolvimento de Um Absorvedor Inspirado na Forma de Oxalis Tetraphylla Utilizando Metassuperfície e Superfície Seletiva em Frequência. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Informação. HORA DE INÍCIO: **14h00** – LOCAL: **Sala Virtual, conforme Art. 5º da PORTARIA SEI Nº 01/PRPG/UFCG/GPR, DE 09 DE MAIO DE 2022.** Em sessão pública, após exposição de cerca de 45 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua tese, obtendo conceito APROVADO. Face à aprovação, declara o presidente da Comissão, achar-se o examinado, legalmente habilitado a receber o Grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o(a) mesmo(a) faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Leandro Ferreira de Lima, e os membros da Comissão Examinadora. Campina Grande, 12 de Junho de 2025.

LEANDRO FERREIRA DE LIMA

Secretário

FRANCISCO MARCOS DE ASSIS, Dr., UFCG
Presidente da Comissão e Examinador Interno

ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, D.Sc., UFCG

Orientador

ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA CAMPOS, D.Sc., UFRN
Orientador

WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc., UFCG

Examinador Interno

ALFREDO GOMES NETO, D.Sc., IFPB
Examinador Externo

MAURÍCIO WEBER BENJÓ DA SILVA , D.Sc., UF
Examinador Externo

JULIETE DA SILVA SOUZA
Candidata

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Tese de Doutorado do candidato **JULIETE DA SILVA SOUZA,** assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários **certificam** que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.

Documento assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA DE LIMA**, **SECRETÁRIO (A)**, em 13/06/2025, às 09:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE JEAN RENE SERRES**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/06/2025, às 10:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **Alfredo Gomes Neto**, **Usuário Externo**, em 13/06/2025, às 13:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **JULIETE DA SILVA SOUZA**, **Usuário Externo**, em 13/06/2025, às 15:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **FRANCISCO MARCOS DE ASSIS**, **PROFESSOR 3 GRAU**, em 15/06/2025, às 09:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **WAMBERTO JOSE LIRA DE QUEIROZ**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/06/2025, às 13:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade, informando o código verificador **5571293** e o código CRC **AD46B56D**.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CNPJ nº 05.055.128/0001-76
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

DECLARAÇÃO

Processo nº 23096.039083/2025-77

DECLARAMOS para fins de comprovação que os Professores FRANCISCO MARCOS DE ASSIS, Dr., UFCG - Presidente da Comissão e Examinador Interno, ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, D.Sc., UFCG - Orientador, ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA CAMPOS, D.Sc., UFRN -Orientador, WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc., UFCG - Examinador Interno, ALFREDO GOMES NETO, D.Sc., IFPB - Examinador Externo, MAURÍCIO WEBER BENJÓ DA SILVA , D.Sc., UFF - Examinador Externo, participaram da Banca de Defesa Final da Tese de Doutorado, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG, intitulada: **Desenvolvimento de Um Absorvedor Inspirado na Forma de Oxalis Tetraphylla Utilizando Metassuperfície e Superfície Seletiva em Frequência**, de autoria da doutoranda **JULIETE DA SILVA SOUZA ,** no dia 12 de junho de 2025.

Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE JEAN RENE SERRES**, **COORDENADOR(A)**, em 13/06/2025, às 10:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade, informando o código verificador **5571343** e o código CRC **43BF7743**.

Referência: Processo nº 23096.039083/2025-77 SEI nº 5571343

Caro Professor
Alexandre Jean René Serres
Coordenador do PPgEE/UFCG.

Eu, **ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA CAMPOS, D.Sc., UFRN,** na qualidade de orientador da comissão examinadora da defesa de tese intitulada **"**Desenvolvimento de Um Absorvedor Inspirado na Forma de Oxalis Tetraphylla Utilizando Metassuperfície e Superfície Seletiva em Frequência"**,** de **JULIETE DA SILVA SOUZA,** da qual participei por videoconferência, no dia 12 de Junho de 2025, declaro ter recebido cópia da ata, que consta nos autos do processo n° 23096.039083/2025-77 como documento n° (5571293), a qual li e, embora não tenha podido assinar, é para todos os efeitos como se eu tivesse, pois está em perfeita conformidade com o que foi deliberado pela comissão e, portanto, estou de pleno acordo com seus termos.

gov.br Documento assinado digitalmente
ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA CAMPOS
Data: 13/06/2025 11:38:04-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA CAMPOS, D.Sc., UFRN.

Caro Professor
Alexandre Jean René Serres
Coordenador do PPgEE/UFCG

Eu, **MAURÍCIO WEBER BENJÓ DA SILVA, D.Sc., UFF** na qualidade de avaliador da comissão examinadora da defesa de tese intitulada **"**Desenvolvimento de Um Absorvedor Inspirado na Forma de Oxalis Tetraphylla Utilizando Metassuperfície e Superfície Seletiva em Frequência"**,** de **JULIETE DA SILVA SOUZA,** da qual participei por videoconferência, no dia 12 de Junho de 2025, declaro ter recebido cópia da ata, que consta nos autos do processo n° 23096.039083/2025-77 como documento n° (5571293), a qual li e, embora não tenha podido assinar, é para todos os efeitos como se eu tivesse, pois está em perfeita conformidade com o que foi deliberado pela comissão e, portanto, estou de pleno acordo com seus termos.

gov.br Documento assinado digitalmente
MAURICIO WEBER BENJO DA SILVA
Data: 24/06/2025 13:54:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

MAURÍCIO WEBER BENJÓ DA SILVA, D.Sc., UFF.

Dedico esta tese aos meus pais, que sempre foram meus maiores incentivadores e acreditaram no poder transformador da Educação.

Agradeço também a todos os professores que confiaram em mim ao longo dessa trajetória. Vocês foram verdadeiros influenciadores e fundamentais para me guiar nesta jornada acadêmica, inspirando minha escolha pela carreira docente.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”.

José de Alencar

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder o dom da vida e por abençoar todas as etapas da minha jornada, tanto nesta fase quanto em todos os âmbitos da minha existência.

Agradeço imensamente aos meus pais, Sônia e Joacir, pelo amor, carinho e apoio incondicional na minha jornada acadêmica, sempre me incentivando a transformar minha realidade por meio da Educação.

Agradeço aos meus irmãos, Janiere, Joacir Filho e Daniel, pelo apoio e carinho nesta etapa. Em especial, agradeço a meu irmão Janiere pela parceria, amizade e por não me deixar desistir, sendo um grande amigo e confidente. Você é um exemplo para mim, tanto pela pessoa que é quanto pelo profissional que se tornou.

Sou grata pela vida do meu sobrinho e afilhado Pedro Daniel, que trouxe união, alegria e tranquilidade para nossa família em meio a tempos desafiadores e conturbados.

Agradeço aos meus orientadores, professores Alexandre Serres e Antônio Campos, pela confiança na realização deste trabalho e pelos valiosos aprendizados compartilhados ao longo desta fase. Expresso minha gratidão aos membros da banca pela disponibilidade e contribuição na melhoria da minha pesquisa.

Expresso minha profunda gratidão ao professor Alfredo pelo apoio nesta fase do doutorado. Alfredo é uma grande inspiração para mim, tanto como pessoa quanto como professor. Sou imensamente grata por tudo o que fez por mim durante o mestrado no IFPB, pelos conselhos e pelo auxílio na fase experimental desta pesquisa.

Agradeço aos amigos que me apoiaram nesta fase: Andrécia, Thamirys, Deisy e Gilliane. Que Deus abençoe vocês. Quero expressar também minha gratidão a todos os membros do Laboratório de Radiometria UFCG pelo acolhimento desde o primeiro dia em que ingressei na instituição. Em especial, agradeço às minhas amigas Jéssica e Joyce pelos momentos de escuta e desabafos nesta jornada de pós-graduação, pelos conselhos, risadas e aprendizados compartilhados.

Gostaria de expressar minha gratidão a todos os professores que fizeram parte da minha jornada acadêmica. Com vocês, aprendi a admirar, valorizar, respeitar e amar a carreira docente.

Deixo registrado meu agradecimento por todos os momentos de aprendizado no Capítulo Estudantil IEEE APS-UFCG, onde tive oportunidades incríveis de desenvolvimento profissional e pessoal. Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro durante todo o período do doutorado.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova estrutura absorvedora do tipo absorve/transmite, inspirada na geometria da planta *Oxalis tetraphylla*. O absorvedor é constituído por uma metassuperfície de meio efetivo combinada com uma Superfície Seletiva em Frequência (FSS) do tipo *patch*, que substitui o plano de terra tradicional utilizado em projetos de metassuperfícies absorvedoras. A primeira fase do projeto inclui o desenvolvimento de uma FSS projetada para operar em 1,6 GHz, 2,5 GHz e 3,5 GHz, cujos resultados experimentais indicam frequências de ressonância em 1,62 GHz, 2,47 GHz e 3,43 GHz. A FSS demonstra independência de polarização, estabilidade angular para incidências de até 30° e bandas de frequência espaçadas, com razões de frequência de 1,52 e 1,39, ambas inferiores a 2. Na segunda fase, são adicionadas aberturas diagonais à geometria para aprimorar a absorção eletromagnética e otimizar o casamento de impedância. Esse *design* proporciona maior flexibilidade, melhor aproveitamento do espaço na célula unitária e um ajuste mais preciso à resposta multibanda em frequências próximas. Um protótipo do absorvedor, é fabricado em um arranjo de 5 × 5 células unitárias com dimensões totais de 260 mm × 260 mm, é testado na faixa de 1 GHz a 4 GHz no laboratório GTEMA/IFPB. As medições são realizadas utilizando um analisador de rede vetorial e antenas corneta de banda ultralarga. O absorvedor atingi picos máximos de absorção de 98,66%, 99,67% e 98,62% nas frequências de 1,65 GHz, 2,4 GHz e 3,51 GHz, respectivamente. As razões de frequência de absorção foi de 1,45 (entre segunda e a primeira) e 1,46 (entre a terceira e a segunda), mantendo-se abaixo de 2 e confirmando a obtenção de bandas de absorção próximas. A estrutura proposta demonstra independência de polarização, estabilidade angular para ângulos oblíquos de até 30° e operação eficiente nas bandas S e C. Na banda S (por exemplo, 1,65 GHz), é adequado para comunicações por satélite, GPS e aplicações militares, enquanto na banda C, é ideal para redes Wi-Fi (2,4 GHz) e sistemas 5G (3,51 GHz).

Palavras-Chaves: Absorvdor baseado em metamaterial. FSS. Frequências próximas. *Oxalis tetraphylla.*

ABSTRACT

This work presents a novel absorber structure of the absorb/transmit type, inspired by the geometry of the *Oxalis tetraphylla* plant. The absorber is composed of an effective medium metasurface combined with a patch-type Frequency Selective Surface (FSS), which replaces the traditional ground plane used in conventional metasurface absorber designs. The first phase of the project involves the development of an FSS designed to operate at 1.6 GHz, 2.5 GHz, and 3.5 GHz. Experimental results indicate resonance frequencies at 1.62 GHz, 2.47 GHz, and 3.43 GHz. The FSS demonstrates polarization independence, angular stability for incident angles up to 30°, and spaced frequency bands with frequency ratios of 1.52 and 1.39, both below 2. In the second phase, diagonal slots are added to the geometry to enhance electromagnetic absorption and optimize impedance matching. This design offers greater flexibility, improved utilization of the unit cell area, and a more precise tuning of the multiband response at closely spaced frequencies. A prototype of the absorber, fabricated as a 5 × 5 array of unit cells with total dimensions of 260 mm × 260 mm, was tested in the 1 GHz to 4 GHz range at the GTEMA/IFPB laboratory. Measurements were carried out using a vector network analyzer and ultra-wideband horn antennas. The absorber achieved peak absorption levels of 98.66%, 99.67%, and 98.62% at 1.65 GHz, 2.4 GHz, and 3.51 GHz, respectively. The frequency absorption ratios were 1.45 (between the second and the first) and 1.46 (between the third and the second), remaining below 2, thereby confirming the achievement of closely spaced absorption bands. The proposed structure exhibits polarization independence, angular stability for oblique incidences up to 30°, and efficient operation in both the S and C bands. In the S band (e.g., 1.65 GHz), it is suitable for satellite communications, GPS, and military applications, while in the C band, it is ideal for Wi-Fi networks (2.4 GHz) and 5G systems (3.51 GHz).

Keywords: Metamaterial-based absorber. FSS. Closely frequencies. *Oxalis tetraphylla.*

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros que influenciam na resposta em frequência das FSS. 32
Figura 2 - Tipos de elementos de FSS e suas respostas em frequência. 33
Figura 3 - Grupo 1 n-polos conectados pelo centro. 34
Figura 4 - Grupo 2 elementos tipo espiras. 34
Figura 5 - Grupo 3 elementos de interior sólido. 35
Figura 6 - Grupo 4 elementos tipo combinações. 35
Figura 7 - - Elementos tipo fractal Minkowski e pré-fractal de Peano. 36
Figura 8 - Exemplo de FSS com elementos convolucionadas. 37
Figura 9 - Exemplo de FSS de anteparo fino. 39
Figura 10 - Exemplo de FSS de anteparo espesso. 39
Figura 11 - Exemplos de FSS passiva. 40
Figura 12 - Exemplo de FSS ativa com diodo PIN. 41
Figura 13 - Aplicação de FSS na porta do forno micro-ondas. 42
Figura 14 - Radome revestido com uma tela de FSS. 42
Figura 15 - Aplicação de FSS como janela inteligente. 43
Figura 16 - FSS em filme fino transparentes para aplicações em janelas inteligentes. 44
Figura 17 - Exemplo de FSS utilizada como superestrato em antena patch para aplicações 5G. 45
Figura 18 - FSS reconfigurável aplicada como superestrato para uma antena patch circular UWB. 46
Figura 19 - FSS passiva para aplicações em paredes inteligentes na banda de Wi-Fi 2,45 GHz e 5,8 GHz. 47
Figura 20 - RFSS para aplicação em 2400-2483,5 MHz (Wi-Fi). 47
Figura 21 - FSS passiva aplicada como papel de parede seletivo para bloqueio de sinais GSM. 48
Figura 22 – Exemplo de absorvedores piramidais usados em câmaras anecoicas. 51
Figura 23 - Exemplo de um absorvedor eletromagnético do tipo com perdas. 51
Figura 24 - Exemplo um absorvedor baseado em metamaterial para aplicações em EMC/EMI. 52
Figura 25 - Tela de Salisbury: (a) geometria (b) circuito equivalente (c) desempenho. 57
Figura 26 - Absorvedor Jaumann: (a) geometria (b) circuito equivalente (c) desempenho. 58
Figura 27 - Modelo do absorvedor Dallenbach. 59

Figura 28 - FSS absorvedora para aplicações em WLAN em ambientes internos. 60
Figura 29 - Configurações de projetos de absorvedores FSS. 61
Figura 30 - Absorvedor FSS: (a) Configuração de FSS (b) FSS com característica de absorvedor. 62
Figura 31 - Respostas típicas de estruturas AFSR e AFST: (a) Coeficiente de reflexão para uma estrutura AFSR (b) Coeficientes de reflexão e transmissão para a estrutura AFST. 62
Figura 32 - Primeiro projeto absorvedor de metamaterial perfeito relatado. 66
Figura 33 - Metassuperfície desenvolvida por Yousaf et al. (2022a). 67
Figura 34 - Metassuperfície absorvedoras ultrafina e flexível projetada por Liu, Sun e Wang (2020). 68
Figura 35 - Metassuperficie reconfigurável reflexão/absorção de Song et al. (2021). 69
Figura 36 - Metassuperfície ativa com transistores de Li et al. (2017). 69
Figura 37 - Metassuperfície absorvedora desenvolvida por Kalraiya et al. (2020). 74
Figura 38 - Metassuperfície absorvedora desenvolvida por Deng et al. (2020). 75
Figura 39 - Metassuperfície absorvedora proposta por Edries et al. (2020). 77
Figura 40 - Metassuperfície absorvedora proposta por Jain et al. (2021). 78
Figura 41 - Metassuperfície absorvedora proposta por Yousaf et al. (2022b). 80
Figura 42 - Metassuperfície absorvedora proposta por Hossain et al. (2022). 81
Figura 43 - Metassuperfície absorvedora proposta por Dey e Dey (2022). 82
Figura 44 - Metassuperfície absorvedora proposta por Shukoor e Dey (2022). 83
Figura 45 - Metassuperfície absorvedora proposta por Bennaoum et al. (2023). 84
Figura 46 - Metassuperfície absorvedora proposta por Genikala, Ghosh e Roy (2023). 85
Figura 47 - Metassuperficie absorvedora desenvolvida por Hakim et al. (2023). 86
Figura 48 - Metassuperfície absorvedoras multicamadas propostas por Routray e Ghosh (2024). 87
Figura 49 - Metassuperfície absorvedora proposta por Pati e Sahoo (2024). 88
Figura 50 - Descrição das etapas da metodologia. 82
Figura 51 – Elemento metálico da FSS baseado no formato da planta Oxalis tetraphylla. 83
Figura 52 - Geometria gerada a partir dos parâmetros: a = 4, b = 6, m = 4, n_1 = 6, n_2 = n_3 = –1. 84
Figura 53 - Geometria após ajustes feito no software LibreCAD. 85
Figura 54 - Etapas de construção da geometria final: (a) Geometria ajustada no LibreCAD e importada para o HFSS; (b) padrão copiado com escala 1,59×1,40; (c) aplicação do comando

de subtração para obtenção da primeira espira; (d) segunda espira; (e) terceira espira e (f) quarta espira. 85
Figura 55 - Célula unitária da FSS: (a) Vista frontal e (b) Vista em perspectiva. 86
Figura 56 - Condições de contorno usadas para simulação célula unitária da FSS. 87
Figura 57 - Transmissão (dB) x Frequência (GHz), pol. H e pol. V, FSS. 88
Figura 58 - Transmissão (dB) × Frequência (GHz), FSS: (a) pol. H e (b) pol. V, para θ = 0°, 15° e 30°. 89
Figura 59 - Distribuição de campo da FSS inspirada na forma de Oxalis tetraphylla. 90
Figura 60 - Distribuição de corrente de superfície da FSS inspirada na forma de Oxalis tetraphylla. 90
Figura 61 - Etapas para projeto da célula unitária da camada superior do absorvedor proposto. 91
Figura 62 - Absorvedor proposto: (a) Camada superior, (b) Camada inferior e (c) Estrutura completa. 93
Figura 63 - Análise numérica dos coeficientes de transmissão e reflexão do absorvedor proposto. 94
Figura 64 - Análise numérica da absorção do absorvedor proposto, pol. H. e pol. V. 95
Figura 65 - Análise numérica da estabilidade angular do absorvedor proposto: (a) pol. H e (b) pol. V. 96
Figura 66 - Distribuição de campo do absorvedor proposto. 97
Figura 67 - Distribuição de corrente de superfície do absorvedor proposto. 98
Figura 68 - Análise numérica dos coeficientes de transmissão e reflexão do absorvedor proposto girando 90°. 99
Figura 69 - Análise numérica da absorção do absorvedor proposto, pol. H. e pol. V girando 90°. 99
Figura 70 - Parte real e imaginária da impedância efetiva normalizada do absorvedor proposto. 102
Figura 71 - Parte real (a) e imaginária (b) da permissividade elétrica efetiva do absorvedor proposto. 103
Figura 72 - Parte real (a) e imaginária (b) da permeabilidade magnética efetiva do absorvedor proposto. 103
Figura 73 - Etapa de exportação do 'dxf' do projeto para o corte do adesivo. 105
Figura 74 - Processo de retirar as partes desnecessárias do adesivo com pinça e bisturir. 105
Figura 75 - Protóptipos antes da corrosão no percloreto de ferro. 106

Figura 76 - Protótipo da FSS inspirado na forma de Oxalis tetraphylla. 107
Figura 77 - Setup de medição. 108
Figura 78 - Resposta em frequência, Transmissão (dB) × Frequência (GHz), FSS, V. pol, simulado e medido. 109
Figura 79 - Resposta em frequência, Transmissão (dB) × Frequência (GHz), FSS, V. pol, resultados simulados e medidos, para θ = 0 ° e θ = 30 °. 110
Figura 80 - Absorvedor do tipo absorve/transmite proposto: 111
Figura 81 - Setup de medição para o coeficiente de reflexão. 112
Figura 82 - Coeficiente de transmissão simulado e medido do absorvedor proposto. 113
Figura 83 - Coeficiente de reflexão simulado e medido do absorvedor proposto. 114
Figura 84 - Absorção simulada e medida do absorvedor proposto. 115
Figura 85 - Coeficiente de transmissão medido do absorvedor proposto para θ = 0° e θ = 30°. 116
Figura 86 - Coeficiente de reflexão medido do absorvedor proposto para θ = 0° e θ = 30°. 116
Figura 87 - Absorção medida do absorvedor proposto para θ = 0° e θ = 30°. 117

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os trabalhos do estado da arte e trabalho desta tese 89
Tabela 2 - Parâmetros eletromagnéticos constitutivos recuperados do absorvedor proposto. 104

LISTAS DE QUADROS

Quadro 1 - Conclusões das análises comparativas feita por Wu (1995). 38

LISTA DE SIGLAS

AFSR/T	*Absorptive Frequency-Selective Reflection/Transmission* (Estruturas de Reflexão/Transmissão Seletivas em Frequência)
EMA	*Electromagnetic Absorbers* (Absorvedores Eletromagnéticos)
EMC	*Electromagnetic Compatibility* (Compatibilidade Eletromagnética)
EMI	*Electromagnetic Interference* (Interferência Eletromagnética)
FBW	*Fractional Bandwidth* (Largura de Banda Fracionária)
FET	Transistores de Efeito de Campo
f_R	*Frequency Ratio* (Razão de Frequência)
FSS	*Frequency Selective Surface* (Superfície Seletiva em Frequência)
FSA	Absorvedor Seletivo de Frequência
FSR	Rasorber Seletivo em Frequência
FWHM	*Full Width at Half Maximum* (Largura a Meia Altura)
GSM	*Global System for Mobile Communications* (Sistema Global para Comunicações Móveis)
HIS	*High Impedance Surface* (Superfície de Alta Impedância)
ITO	Óxido de Estanho e Índio
MARE	Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética
MMs	Metamateriais
NR	*New Radio* (Novo Rádio)
RAM	*Radar Absorbing Materials* (Materiais de Absorção de Radar)
RF	Radiofrequência
RFSS	Superfície Seletiva em Frequência Reconfiguravél
RAS	*Radar Absorbing Structures* (Estruturas Absorvedores de Radar)
RCS	*Radar Cross Section* (Seção Transversal de Radar)
SLEM	*Single-Layer Effective Medium* (Meio Efetivo de Camada Única)
SRRs	*Split Ring Resonator* (Ressonadores de Anéis Fendidos)
TE	Transversal Elétrico
TM	Transversal Magnético
UWB	*Ultra-wideband* (Banda Ultralarga)
WLAN	*Wireless Local Area Network* (Rede Local sem Fio)

LISTA DE SÍMBOLOS

dB	Decibéis
h	Espessura
λ	Comprimento de onda
σ	Condutividade
Γ	Coeficiente de reflexão
ω	Frequência angular
Z	Impedância intrínseca
Z_0	Impedância do espaço livre
Z_{in}	Impedância de entrada
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
Ω	Ohm
ε	Permissividade elétrica
ε_r	Permissividade elétrica relativa
μ	Permeabilidade magnética
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
k_0	Constante de propagação da onda no vácuo
δ	Tangente de perdas
θ	Ângulo de incidência
ON	Ligada
OFF	Desligado
R_s	Resistividade superficial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **25**
1.1 Motivação **27**
1.2 Objetivo Geral **28**
1.3 Objetivos Específicos **28**
1.4 Contribuições **28**
1.5 Organização do Documento **29**
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **31**
2.1 Superfície Seletivas em Frequência **31**
2.1.1 Classificação Quanto ao Preenchimento da Célula Unitária 33
2.1.2 Classificação Quanto à Geometria do Elemento da Célula Unitária 34
2.1.3 Classificação Quanto à Espessura 38
2. 1.4 Classificação Quanto à Reconfiguração dos Arranjos 40
2.2 Aplicações **41**
2.2.1 Anteparo da Porta de Forno de Micro-Ondas 41
2.2.2 Radomes 42
2.2.3 Janelas Eficientes 43
2.2.4 FSS Aplicadas a Superestrato de Antenas 44
2.2.5 Paredes Inteligentes e Papel de Parede 46
2.3 Absorvedores de Micro-Ondas **49**
2.4 Absorvedores Convencionais **56**
2.5 Absorvedor FSS **59**
2.6 Metassuperficies Absorvedoras **64**
2.7 Geometria Bioinspirada e Superfórmula de Gielis **70**
2.8 Considerações Parciais **71**
3 ESTADO DA ARTE **72**
3.1 Levantamento Bibliográfico de 2018 a 2024 ..... **73**
3.2 Considerações Parciais **81**
4 METODOLOGIA **82**
4.1 Projeto e Simulação da FSS Inspirada na Forma *Oxalis Tetraphylla* **83**
4.2 Projeto e Simulação da Metassuperfície e FSS como Plano de Terra **91**
4.3 Análises da Extração dos Parâmetros Efetivos da Estrutura Multicamada Simulada **99**

4.4 Etapas da Fabricação dos Protótipos 104
4.5 Considerações Parciais 106
5 VALIDAÇÃO DAS ANÁLISES NUMÉRICAS E EXPERIMENTAIS 107
5.1 Caracterização Experimental da FSS Inspirada na Forma de *Oxalis Tetraphylla* .. 107
5.2 Caracterização Experimental da Metassuperfície e FSS como Plano de Terra 110
5.3 Considerações Parciais 117
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 118
6.1 Sugestões de Trabalhos Futuros 120
6.2 Trabalhos Publicados Durante o Doutorado 121
6.2 Colaborações em Publicações no Grupo de Pesquisa de Radiometria-UFCG 122
6.3 Premiações 123
REFERÊNCIAS 124

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A engenharia de telecomunicações é um dos campos do conhecimento que mais tem se desenvolvido nas últimas décadas, principalmente em virtude da mobilidade da comunicação sem fio e do desenvolvimento de novos dispositivos eletrônicos. Contudo, a popularização do uso das redes de comunicação sem fio resultou em uma maior exposição à radiação eletromagnética e interferências. O uso simultâneo de sistemas de comunicação móvel pode levar à propagação de sinais além das áreas designadas, ocasionando distorção nos sinais transmitidos. Portanto, é essencial que os sistemas sejam capazes de operar eficientemente mesmo na presença dessas interferências, ou ainda, que sejam adotadas medidas para reduzi-las (Halder *et al.*, 2019; Indrusiak *et al.,* 2021).

Neste sentido, a pesquisa sobre absorção e blindagem eletromagnética tem ganhado destaque. Os dispositivos de absorção e blindagem eletromagnética são amplamente empregados em equipamentos militares, dispositivos médicos e ambientes internos de edificações, com o objetivo de proteger sistemas de comunicação sem fio, instrumentos de precisão e a saúde humana contra exposição indesejada à radiação eletromagnética. Esa área de estudo tornou-se popular devido à sua relevância na garantia da segurança e do bom funcionamento desses dispositivos e na prevenção de danos causados pela exposição aos campos eletromagnéticos (Tan *et al.,* 2021).

Na prática, os dispositivos de absorção eletromagnética, também conhecidos como absorvedores, devem apresentar características como: espessura reduzida, leveza, alta capacidade de absorção, flexibilidade no *design*, resistência mecânica e insensibilidade à polarização, que possam absorver a interferência eletromagnética incidente de qualquer direção e em qualquer ângulo. Essas características são essenciais para garantir a eficiência e versatilidade desses dispositivos, permitindo sua aplicação em áreas como telecomunicações, eletrônica, aeroespacial e medicina. A absorção de ondas eletromagnéticas está relacionada à capacidade de uma estrutura ou material de reduzir a energia da onda incidente. Essas estruturas, em sua forma básica, convertem parte da intensidade do campo eletromagnético em calor, resultando em redução significativa das ondas refletidas e refratadas, além disso os absorvedores eletromagnéticos podem apresentar diversos tipos e formas (Cheng; Luo; Chen, 2020; Tirkey; Gupta, 2019).

Os absorvedores convencionais de banda larga são projetados utilizando técnicas de casamento de impedância, o que lhes confere a capacidade de operar eficientemente em diversas faixas de frequência No entanto, essas estruturas geralmente apresentam configurações volumosas, o que dificulta sua integração em sistemas compactos ou em aplicações que exigem baixo perfil, como por exemplo em dispositivos portáteis. Adicionalmente, a presença de um plano de terra completo em suas configurações intensifica os problemas de interferência causados por multipercursos, limitando o uso desses absorvedores em ambientes específicos (Su, 2010).

As pesquisas nessa área têm se concentrado no aprimoramento do desempenho dos dispositivos convencionais, especialmente na ampliação das bandas de absorção e na miniaturização das estruturas por meio de métodos de fabricação simplificados. Projetos inovadores de absorvedores com Superfícies Seletivas em Frequência (FSS) foram desenvolvidos, consistindo em arranjos periódicos bidimensionais ou tridimensionais de elementos condutores, aberturas ou uma combinação de ambos, em diferentes formatos aplicados a diversos substratos. Esses absorvedores são projetados para absorver ondas eletromagnéticas incidentes em uma faixa específica de frequência (Areias *et al.*, 2020).

As estruturas planares com comportamento de metamaterial, também conhecidas por metassuperfícies, vêm despertando interesse no desenvolvimento de absorvedores de micro-ondas. Essas estruturas são projetadas para exibir propriedades eletromagnéticas diversas que não são encontradas nos materiais existentes na natureza. Um exemplo dessas propriedades são: permissividade elétrica e/ou permeabilidade magnética negativa e índice de refração negativo. Essas características podem ser obtidas por meio da combinação de metais, materiais dielétricos, filmes finos resistivos e do uso de geometrias com comportamento de metamaterial, como os ressonadores de anel fendido (SRRs - *Split Ring Resonator*) (Khoshniat, 2019; Tak; Choi, 2016).

Além disso, as metassuperfícies propiciam ao projeto de absorvedores um *design* flexível que permite sua miniaturização e diversidade de aplicações em todo o espectro eletromagnético. Essa flexibilidade torna possível utilizar os absorvedores baseados em metamaterial em uma ampla variedade de contextos, desde comunicações sem fio até dispositivos ópticos avançados, abrindo caminho para soluções inovadoras e eficientes na absorção da radiação eletromagnética indesejada. Todavia, essas estruturas apresentam limitações em relação ao uso final devido à necessidade de um plano de terra completo ou à complexidade de estruturas tridimensionais (Chen; Taylor; Yu, 2016; Wang, 2019).

O interesse nos projetos de absorvedores baseados em FSS e metassuperfícies se deve à propriedade de blindagem proporcionada por essas estruturas, sendo possível realizar a absorção seletiva em faixas de frequência específicas ou em várias faixas, ao mesmo tempo em que permite a transmissão de sinais nas bandas desejadas. Essa abordagem proporciona flexibilidade no controle da absorção e transmissão, tornando os absorvedores baseados em FSS e metassuperfícies uma solução promissora para diversas aplicações (Maia, 2022).

1.1 Motivação

O avanço das comunicações sem fio resultou em um aumento significativo na utilização do espectro eletromagnético, potencializando problemas de interferência eletromagnética, especialmente nas faixas não licenciadas. Além disso, as comunicações móveis enfrentam desafios adicionais decorrentes das interferências causadas pelos multipercursos. No entanto, para mitigar esses problemas, é possível recorrer ao uso de absorvedores de micro-ondas, que têm a capacidade de reduzir tanto os efeitos da interferência eletromagnética quanto os problemas provenientes dos multipercursos, que podem degradar ainda mais a qualidade do sinal. Essa solução oferece uma forma eficiente de minimizar os impactos negativos e garantir uma comunicação mais estável e confiável (Marra *et al.*, 2018; Qu *et al.*, 2020).

Foi notado que a maioria dos projetos de absorvedores baseados no projeto de metassuperfícies compartilha uma característica em comum: o uso de um plano de terra completo na última camada (Sekar; Inabathini, 2018; Kalraiya *et al.*, 2019; Edries *et al.*, 2020; Hannan *et al.*, 2021; Yousaf *et al.*, 2022b; Hakim *et al.*, 2023). No entanto, esse fato pode agravar o problema dos múltiplos percursos nas proximidades das estruturas onde esses absorvedores são instalados.

Diante deste contexto, a presente tese propõe o desenvolvimento de um absorvedor de micro-ondas do tipo absorve/transmite, baseado em uma geometria inspirada na forma da planta *Oxalis tetraphylla*. O absorvedor proposto incorpora características de metamateriais e utiliza uma FSS do tipo *patch* em substituição ao plano de terra completo. O objetivo é desenvolver um absorvedor que seja capaz de minimizar o problema dos múltiplos percursos nas proximidades, ao mesmo tempo em que absorve frequências específicas e permite a transmissão de ondas eletromagnéticas fora dessa faixa.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo principal desta tese é desenvolver um absorvedor do tipo absorve/transmite composta por uma metassuperfície e uma FSS como plano de terra.

Para atingir o objetivo geral foram listados os seguintes objetivos específicos.

1.3 Objetivos Específicos

- Investigar as características relativas as FSS e metassuperfícies;
- Estudar as propriedades das estruturas absorvedoras;
- Pesquisar sobre absorvedores de micro-onda baseadas em metassuperfícies de meio efetivo;
- Compreender o comportamento das estruturas absorvedoras de meio efetivo e suas aplicações em absorvedores de micro-ondas em múltiplas bandas;
- Desenvolver uma geometria bioinspirada usando superfórmula de Gieles;
- Projetar e simular a estrutura usando o *software ANSYS Electronics Desktop* (HFSS);
- Obter uma taxa de absorção superior a 80% nas faixas de interesse;
- Extrair os valores efetivos da permissividade elétrica, permeabilidade magnética e impedância do absorvedor proposto;
- Fabricar protótipo para realização de testes experimentais em laboratório;
- Validar os resultados numéricos e experimentais.

1.4 Contribuições

A pesquisa apresenta contribuições para a área de telecomunicações ao propor uma estrutura inovadora que combina uma geometria bioinspirada com uma metassuperfície de meio efetivo (detalhada no Capítulo 3). A resposta absorve/transmite da estrutura, associada à utilização de uma FSS como substituto do plano de terra completo, possibilita mitigar interferências entre frequências minimamente espaçadas, reduzindo reflexões indesejadas e aprimorando a eficiência espectral, absorvendo reflexões que poderiam causar interferências de fase e amplitude. Essa solução é especialmente relevante para sistemas que operam em ambientes adversos, como áreas urbanas densas ou ambientes internos, onde os efeitos de multipercursos são predominantes.

A estrutura proposta é projetada para operar nas bandas S e C, cobrindo frequências amplamente utilizadas em sistemas modernos. Na banda S (como em 1,65 GHz), ela atende aplicações estratégicas, como comunicações via satélite, GPS e sistemas militares. Na banda C, ela é aplicada às redes Wi-Fi (2,4 GHz) e 5G (3,51 GHz), ampliando sua aplicabilidade em sistemas modernos de telecomunicações.

A independência de polarização e a estabilidade angular tornam a estrutura adequada para diferentes cenários de propagação, garantindo maior confiabilidade e qualidade na transmissão. Com sua compactação e versatilidade, a solução desenvolvida demonstra um bom potencial para otimizar o uso do espectro e impulsionar a eficiência e a robustez das redes de comunicação de próxima geração.

1.5 Organização do Documento

Este trabalho de tese está organizado em seis capítulos. No Capítulo 1 é abordada a introdução, motivação, o objetivo geral e os objetivos específicos e as contribuições da pesquisa.

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica sobre as Superfícies Seletivas em Frequência (FSS), abordando tópicos como definição, classificação, aplicações e outros aspectos relevantes. Além disso, são descritas as principais características dos projetos de absorvedores de micro-ondas convencionais, absorvedores baseados em FSS e metassuperfícies absorvedoras. Também são descritos os principais aspectos relacionados às geometrias bioinspiradas e à superfórmula de Gielis. No Capítulo 3 é apresentado o estado da arte, com uma análise de trabalhos relacionados à utilização de metassuperfície absorvedora baseada estrututas de meio efetivo aplicadas a diferentes bandas de frequências.

No Capítulo 4, são descritas as etapas da metodologia implementada para a realização das análises numéricas e experimentais. Nesse contexto, são apresentadas as etapas das análises numéricas relacionadas ao projeto da FSS e do absorvedor baseado em metassuperfície, com a FSS do tipo *patch* substituindo o plano de terra completo inspirada na forma da planta *Oxalis tetraphylla*. Além disso, são detalhadas a etapa de extração das propriedades efetivas do absorvedor proposto e, por fim, a fabricação dos protótipos usados nas análises experimentais.

No Capítulo 5, são detalhadas as etapas de caracterização experimental em espaço livre realizadas para a FSS e o absorvedor. Além disso, são apresentados os resultados obtidos, destacando a comparação entre os resultados numéricos e experimentais referentes ao

coeficiente de reflexão e o coeficiente de transmissão, aos picos máximos de absorção e à estabilidade angular.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas com a realização desta pesquisa, além das sugestões para trabalhos futuros, das publicações realizadas ao longo do doutorado e das premiações recebidas no período.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os principais aspectos relacionados às Superfícies Seletivas em Frequência (FSS), incluindo definições, classificações com base no preenchimento da célula, geometria da célula unitária, espessura, reconfiguração dos arranjos e exemplos de aplicações. Adicionalmente, são abordadas as principais características dos projetos de absorvedores de micro-ondas, abrangendo absorvedores convencionais, absorvedores baseados em FSS, metassuperfícies absorvedoras, geometrias bioinspiradas e a superfórmula de Gieles.

2.1 Superfície Seletivas em Frequência

Historicamente, os primeiros relatos científicos sobre o estudo das Superfícies Seletivas em Frequência (em inglês, *Frequency Selective Surface* – FSS) datam de 1786, quando David Rittenhouse, em parceria com Francis Hopkinson, realizou experimentos usando grades de difração óptica, as quais eram usadas para decompor um feixe de luz não monocromática em diferentes ordens espectrais (Mittra; Chan; Cwik, 1988).

Mediante a fabricação de um anteparo com arranjos de fios igualmente espaçados, foi possível constatar que, com a incidência de luz, a estrutura comportou-se como um filtro, bloqueando a passagem de alguns comprimentos de onda. O experimento serviu para comprovar que a disposição física de cada elemento, o espaçamento entre eles e se estes eram condutores ou não, influenciavam diretamente na distribuição do campo elétrico sobre a estrutura, relacionando a resposta em frequência às características físicas da FSS. As pesquisas referentes as FSS se expandiram na década de 1960, em virtude do potencial de aplicação dessas estruturas na área militar. Posteriormente, as FSS ganharam espaço nas aplicações em dispositivos e serviços de telecomunicações devido à sua implementação nas faixas de micro-ondas, ondas milimétricas, submilimétricas e terahertz (Munk, 2000; Campos, 2009; Vardaxoglou, 1997).

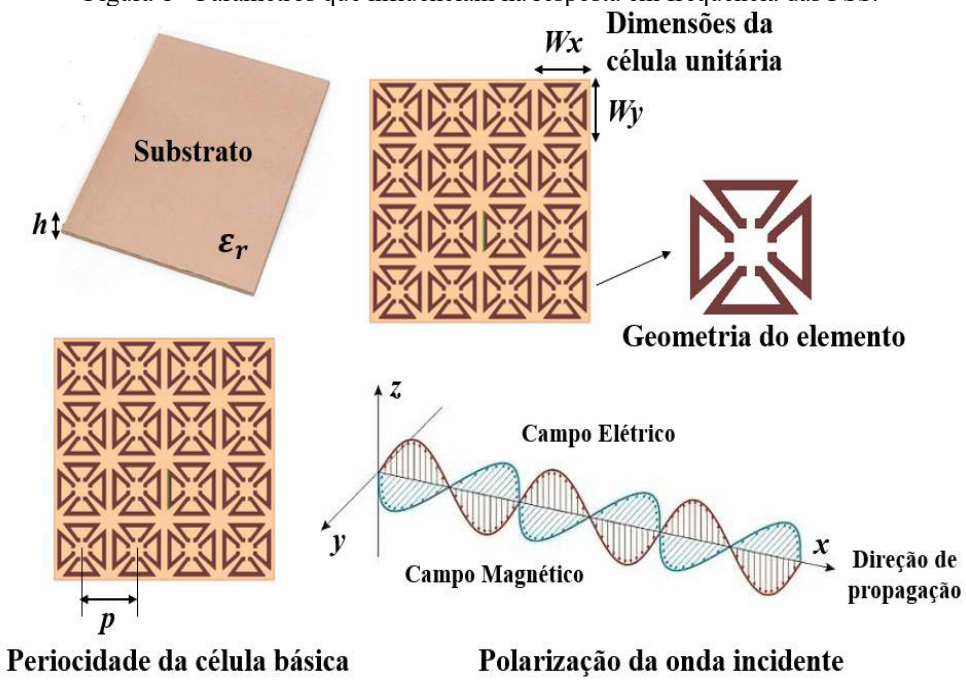
As FSS são geralmente estruturas planares formadas por arranjos periódicos bidimensionais impressos sobre um ou mais substratos dielétricos, com espessura h e permissividade dielétrica relativa ε_r. Essas estruturas possuem comportamento semelhante ao dos filtros eletromagnéticos, podendo ser projetadas com a finalidade de serem transparentes ou refletirem as ondas eletromagnéticas em distintas faixas de frequências. Dependendo do

projeto da célula unitária, a onda plana incidente na estrutura será totalmente ou parcialmente transmitida ou refletida. Este fato ocorre quando a frequência da onda plana corresponde à frequência de ressonância dos elementos da FSS. Dessa maneira, uma FSS pode deixar passar ou atenuar frequências do espectro eletromagnético (Pelletti *et al.,* 2013; Jayakrishnan; Liya, 2020).

A célula unitária de uma FSS possui duas configurações básicas: *patch* ou abertura, cada uma apresentando um tipo de resposta em frequência. O elemento do tipo abertura apresenta uma resposta em frequência do tipo passa-faixa, enquanto o elemento do tipo *patch* apresenta resposta em frequência do tipo rejeita-faixa. Outros parâmetros, como a espessura (h), permissividade dielétrica relativa (ε_r) do substrato, dimensões da estrutura, geometria do elemento e sua periodicidade, também influenciam na resposta em frequência da FSS (Anwar; Mao; Ning, 2018; Kapoor; Mishra; Kumar, 2022).

Na Figura 1 são ilustrados os parâmetros que afetam a resposta em frequência das FSS.

Figura 1 - Parâmetros que influenciam na resposta em frequência das FSS.



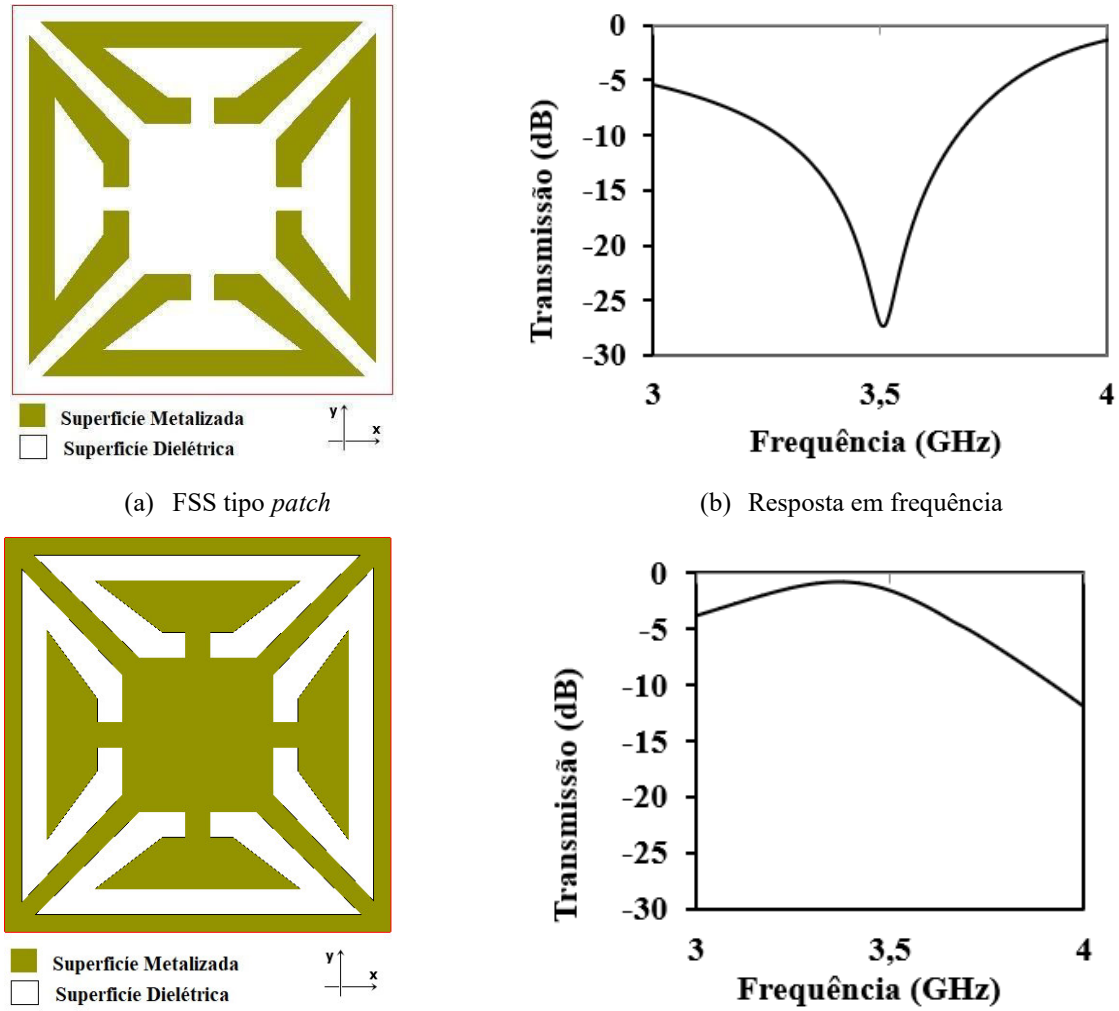
Fonte: Autoria Própria.

A literatura traz algumas das principais classificações da FSS, podendo ser classificadas quanto ao: (I) preenchimento da célula unitária; (II) geometria do elemento da célula unitária; (III) espessura e (IV) excitação dos arranjos.

2.1.1 Classificação Quanto ao Preenchimento da Célula Unitária

A FSS pode ser composta por elementos do tipo *patch* ou abertura. A FSS do tipo *patch* se comporta como um filtro rejeita-faixa, ou seja, na frequência de ressonância, a estrutura se comporta como um condutor perfeito, refletindo quase que totalmente a onda incidente. Em contrapartida, os elementos do tipo abertura apresentam um comportamento semelhante ao de um filtro passa-faixa. Quando esses elementos entram em ressonância, a estrutura se torna "transparente" à onda incidente, permitindo sua passagem (Kapoor; Mishra; Kumar, 2022; Anwar; Mao; Ning, 2018; Campos, 2009). Na Figura 2 (a)-(d), são ilustrados exemplos do comportamento da resposta em frequência de FSS dos tipos *patch* e abertura.

Figura 2 - Tipos de elementos de FSS e suas respostas em frequência.



(a) FSS tipo *patch*

(b) Resposta em frequência

(c) FSS tipo abertura

(d) Resposta em frequência

Fonte: Autoria Própria.

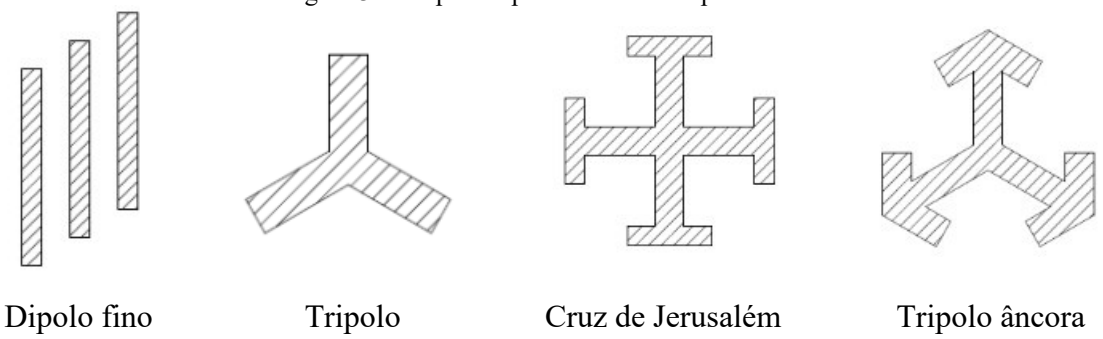
2.1.2 Classificação Quanto à Geometria do Elemento da Célula Unitária

O elemento da célula unitária é um dos parâmetros mais flexíveis no projeto de uma FSS. Dessa forma, diversos pesquisadores vêm desenvolvendo projetos de novas geometrias e variadas combinações para o elemento básico da FSS, sendo exemplos: estrela de quatro braços (Gomes Neto *et al.,* 2020a), formato da espiral de Teodoro (Moreira *et al.,* 2020), matrioska (Gomes Neto *et al*, 2020b), entre outros.

As dimensões da geometria da célula unitária da FSS estão diretamente relacionadas com sua frequência de operação. Conforme Munk (2000), a geometria do elemento básico da célula unitária pode ser dividida em quatro grupos, sendo eles:

- **Grupo 1:** relaciona-se aos n-polos conectados pelo centro. Os mais conhecidos são o dipolo fino, o tripolo, a cruz de Jerusalém e o tripolo âncora, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Grupo 1 n-polos conectados pelo centro.



Fonte: Adaptado de Munk (2000).

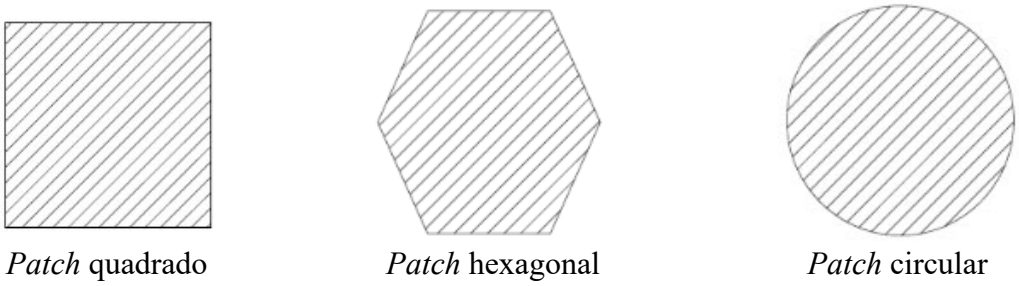
- **Grupo 2:** agrupa os elementos do tipo espira, como por exemplo, as espiras quadradas, circulares e hexagonais, como pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4 - Grupo 2 elementos tipo espiras.

Fonte: Adaptado de Munk (2000).

- **Grupo 3:** é composto pelos elementos de interior sólido, como ilustrado na Figura 5. Os mais comuns são: os *patches* quadrado, hexagonal e circular.

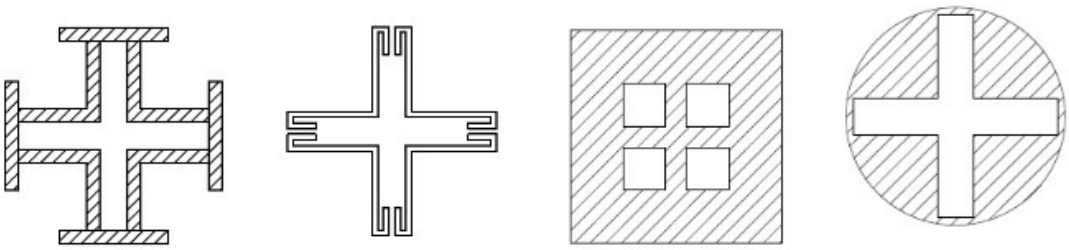
Figura 5 - Grupo 3 elementos de interior sólido.



Fonte: Adaptado de Munk (2000).

- **Grupo 4:** é constituído por elementos formados a partir da modificação e combinação das geometrias típicas. Na Figura 6 são ilustrados alguns exemplos de combinações de elementos de FSS do Grupo 4.

Figura 6 - Grupo 4 elementos tipo combinações.



Fonte: Adaptado de Munk (2000).

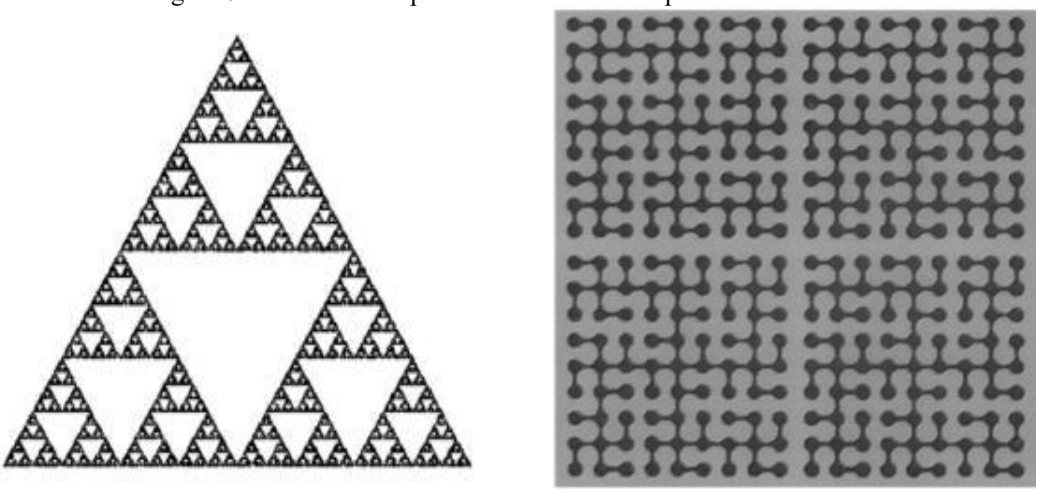
Além das geometrias vistas nos quatro grupos citados, a literatura lista mais dois grupos, são eles, os elementos fractais e os convolucionados (Anwar; Mao; Ning, 2018).

- **Grupo elementos fractais:** os elementos fractais são conjuntos de formas geométricas dispostas a partir de uma métrica simples, com padrões pré-definidos usando cálculos matemáticos para se obter tais parâmetros, nos quais uma menor parte do fractal se assemelha ao todo da estrutura (Maia, 2022). A metodologia iterativa pode ser usada para construir fractais, na qual um padrão geométrico é repetido infinitas vezes; assim, a transformação é generalizada para toda a estrutura. Por outro lado, um pré-fractal é criado parando a etapa iterativa após um número finito de vezes. A utilização de geometrias fractais apresenta uma redução nas dimensões dos elementos, operação

multibanda e/ou UWB (*ultra wideband*) em determinadas respostas em frequência e melhoria na estabilidade da resposta em frequência. Os elementos mais comuns são: Minkowski, Sierpinski e poeira de Cantor (Kapoor; Mishra; Kumar, 2022; Nóbrega *et al.* 2015).

Na Figura 7 podem ser vistos exemplos de geometrias fractais Minkowski e pré-fractal de Peano, respectivamente.

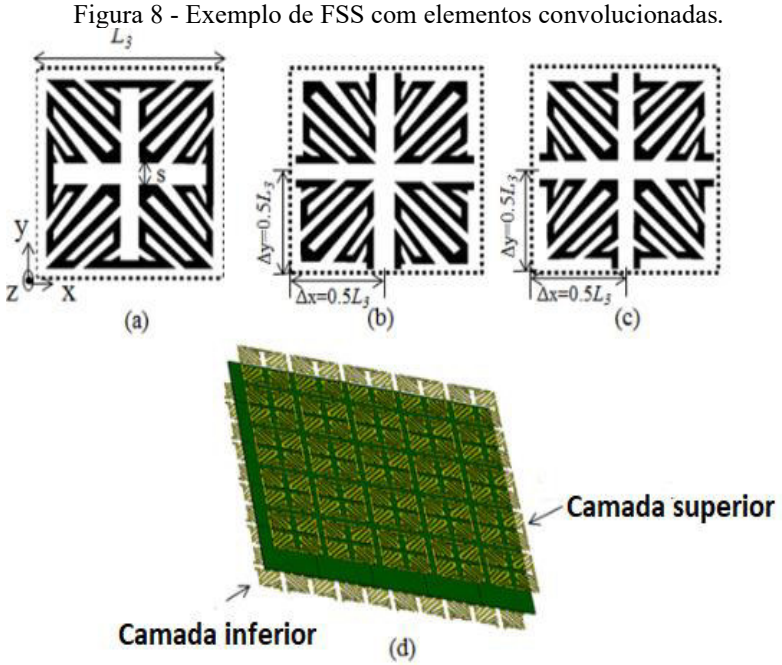
Figura 7 - - Elementos tipo fractal Minkowski e pré-fractal de Peano.



Fonte : Li *et al.* (2014); Nóbrega (2013).

- **Grupo elementos convolucionados:** os estudos mostram que os elementos convolucionados apresentam melhoria na estabilidade angular da resposta em frequência da FSS e maior largura de banda com elementos reduzidos. Por apresentarem tamanho reduzido, esse tipo de elemento é utilizado em projetos de baixa frequência, sendo viável devido ao aumento de seu comprimento elétrico. Na Figura 8 é ilustrado um exemplo de um projeto de FSS de camada dupla, fina e flexível de baixo perfil, operando na banda L com uma banda de rejeição em 1,89 GHz. Esse projeto pode ser aplicado em janelas com transmissão seletiva e blindagem em frequências do sistema Global para Comunicações Móveis (GSM - *Global System for Mobile Communications*).

Figura 8 - Exemplo de FSS com elementos convolucionadas.



Fonte: Adaptado de Dewani *et al*. (2016).

Diante dos avanços nas pesquisas de novos arranjos e combinações de geometrias, alcançando respostas em banda larga ou multibanda, é importante destacar que um bom elemento básico deve apresentar resposta de ressonância estável com a variação dos ângulos de incidência da onda eletromagnética (Munk, 2000; Anwar; Mao; Ning, 2018; Maia, 2022).

Neste sentido, Wu (1995) elaborou uma comparação de desempenho entre seis geometrias de elementos básicos de FSS, tendo para isso empregado a configuração *freestanding* (análise feita para FSS sem camadas dielétricas). Foram analisados quatro parâmetros: estabilidade da frequência de ressonância com ângulo de incidência, nível de polarização cruzada, largura de banda e banda de separação.

No Quadro 1 podem ser vistas as conclusões obtidas nas comparações feitas por Wu (1995), de maneira que o melhor desempenho foi apontado como o número 1, o segundo melhor como o 2 e assim sucessivamente.

Quadro 1 - Conclusões das análises comparativas feita por Wu (1995).

GEOMETRIA	PARÂMETROS ANALISADOS			
	Estabilidade angular	Polarização cruzada	Maior largura de banda	Menor banda de separação
Dipolo	4	1	4	1
Dipolo cruzado	3	3	3	3
Tripolo	3	3	3	2
Cruz de Jerusalém	2	3	2	2
Espira quadrada	1	1	1	1
Anéis circulares	1	2	1	1

Fonte: Adaptado de Wu (1995).

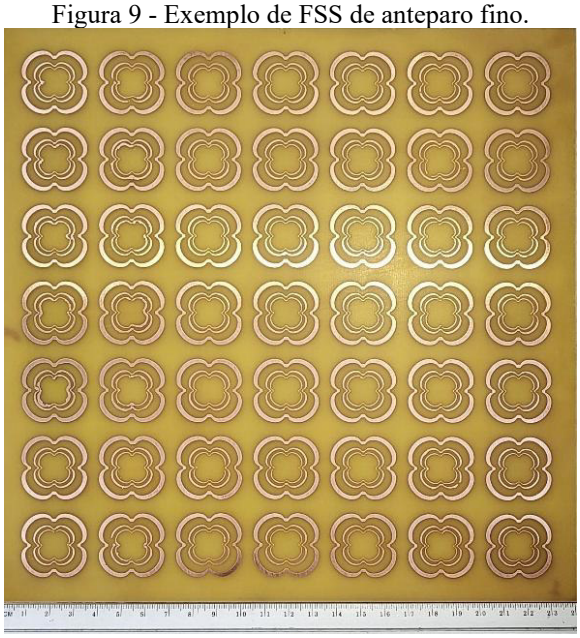
De acordo com a análise de Wu (1995), é possível notar que, entre as geometrias estudadas, o dipolo é o mais sensível à variação do ângulo de incidência da onda, ficando com a classificação 4. Além disso, a geometria propicia uma menor largura de banda e menor banda de separação, em virtude do seu comprimento que é projetado na direção da onda incidente correspondendo a menos da metade do comprimento de onda.

Por outro lado, as geometrias baseadas em espiras quadradas e anéis circulares apresentaram melhor desempenho quando comparadas com as demais, em razão da ressonância destes elementos ocorrer quando o comprimento da espira for múltiplo de um comprimento de onda. No caso da espira circular com substrato dielétrico, é importante que o comprimento elétrico da circunferência seja igual a um comprimento de onda efetivo; o tamanho efetivo da circunferência não deve exceder um comprimento de onda no espaço livre, devido ao efeito de carga do dielétrico (Wu, 1995).

2.1.3 Classificação Quanto à Espessura

Quanto à espessura, as FSS são classificadas como anteparo fino ou anteparo espesso. A FSS do tipo anteparo fino, geralmente, possui uma camada de metalização com espessura menor que $0{,}001\lambda_0$, em que λ_0 é o comprimento de onda para frequência de ressonância do anteparo. As FSS de anteparo fino são leves, menos volumosas e possuem baixo custo de fabricação, pois comumente são fabricadas pela técnica de circuito impresso (Campos, 2009; Munk, 2000; Vardaxoglou, 1997; Wu, 1995). Um exemplo de FSS de anteparo fino fabricada pela técnica de circuito eimpresso é ilustrado na Figura 9.

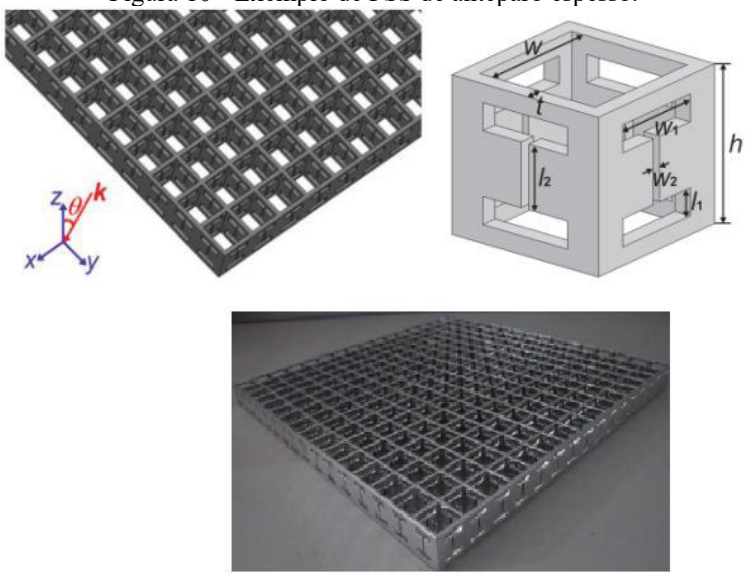
Figura 9 - Exemplo de FSS de anteparo fino.



Fonte: Souza; Campos; Serres. (2024).

Em contrapartida, as FSS do tipo anteparo espesso são caracterizadas por uma camada de metalização mais espessa, conforme o exemplo ilustrado na Figura 10. Essas FSS oferecem a vantagem de uma transição mais rápida da banda passante para a banda de rejeição, conhecida como *roll - off*. No entanto, é importante destacar que esse tipo de FSS possui algumas desvantagens, como custos mais elevados, peso maior e processo de fabricação mais complexo, quando comparado as FSS de anteparo fino (Webb; Michielssen; Mittra, 1992; Harms; Mittra; Ko, 1994).

Figura 10 - Exemplo de FSS de anteparo espesso.

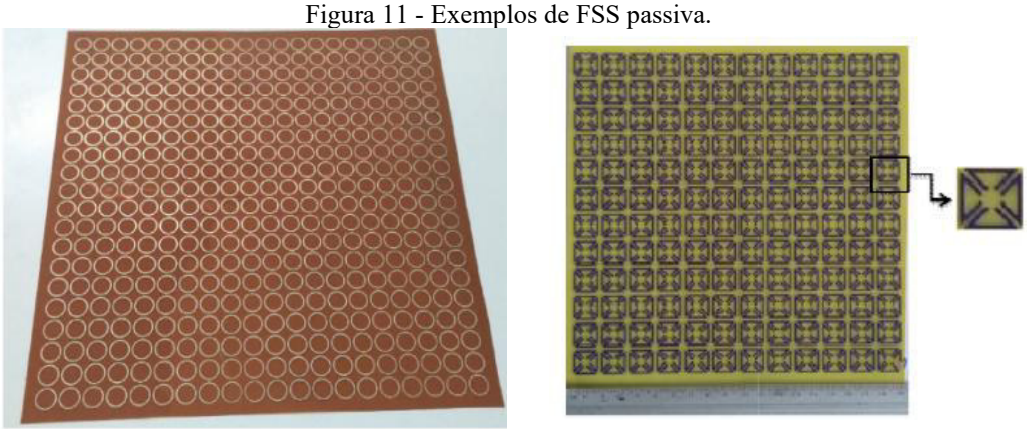


Fonte: Tang *et al.* (2016).

2. 1.4 Classificação Quanto à Reconfiguração dos Arranjos

Nas FSS, a excitação dos arranjos pode ser realizada por meio de uma onda plana incidente ou por geradores individuais conectados a cada elemento. No primeiro caso, a estrutura é conhecida como FSS passiva, em que os arranjos dos elementos podem se comportar como uma interface transparente ou não a uma onda plana incidente aplicada, dependendo do tipo de elemento (abertura ou *patch*). Essas estruturas têm como vantagem a facilidade de projeto e fabricação. Entretanto, possuem como desvantagem o fato de não serem reconfiguradas sem a inserção de componentes externos, tais como diodos PIN, chaves MEMS, varactores, dentre outros (Azemi; Ghorban; Rowe, 2013; Souza; Serres; Gomes Neto, 2021). Na Figura 11 podem ser vistos exemplos de FSS passiva.

Figura 11 - Exemplos de FSS passiva.

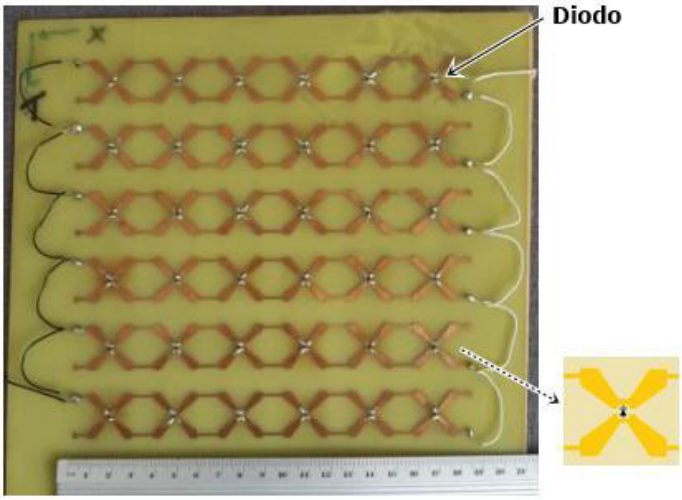


(a) FSS espira circular. (b) FSS anéis trapezoidais abertos.

Fonte: Varkani; Firouzeh; Nezhad (2018); Souza; Serres; Gomes Neto (2021).

No segundo caso, a reconfiguração ou FSS ativa é obtida por modificação da geometria equivalente, por meio da inserção de dispositivos como diodos PIN, varactores, chave MEMS etc. (Azemi; Ghorban; Rowe, 2013; Campos, 2009; Gomes Neto *et al*., 2020a). Na Figura 12 pode ser visto um exemplo de FSS ativa baseada na geometria estrela de quatro braços reconfigurada por diodos PIN inseridos na geometria da FSS.

Figura 12 - Exemplo de FSS ativa com diodo PIN.



Fonte: Adaptado de Gomes Neto *et al*. (2020a).

2.2 Aplicações

Os projetos de FSS são empregados em diversas frequências do espectro eletromagnético, tendo, portanto, diversas aplicações. A seguir, são apresentados exemplos dessas aplicações.

2.2.1 Anteparo da Porta de Forno de Micro-Ondas

Uma das aplicações mais conhecidas de Superfícies Seletivas em Frequência (FSS) encontra-se na porta dos fornos de micro-ondas domésticos. A grade metálica incorporada ao visor atua como uma FSS, permitindo a passagem da luz visível possibilitando a observação do interior do forno, enquanto bloqueia a radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas, tipicamente em torno de 2,45 GHz.

A Figura 13 ilustra, de forma conceitual, o princípio de operação dessa estrutura como filtro eletromagnético, evidenciando sua função seletiva em frequência.

Figura 13 - Aplicação de FSS na porta do forno micro-ondas.

Fonte: Adaptado Freepik (2024).

2.2.2 Radomes

As FSS são comumente empregadas em radomes, que são estruturas que funcionam protegendo e minimizando a interferência eletromagnética nas antenas e respectivos circuitos eletrônicos. Assim, as FSS atuam de maneira a evitar as interferências eletromagnéticas, garantindo a recepção/transmissão somente do sinal na frequência de operação da antena e fora desta banda o sinal é refletido, evitando assim interferências (Maniçoba, 2012). Na Figura 14 é ilustrado um radome de uma aeronave.

Figura 14 - Radome revestido com uma tela de FSS.

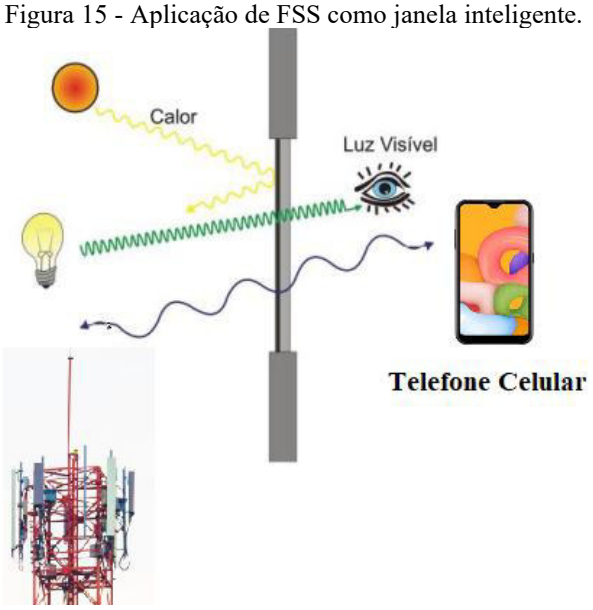
Fonte: Orbitshub (2024).

2.2.3 Janelas Eficientes

O projeto de janelas eficientes é uma técnica implementada por meio da aplicação de uma camada de metal bem fina em janelas modernas, de modo a propiciar economia de energia. Nesse caso, aplica-se uma FSS atuando como um filtro que trabalha bloqueando a radiação eletromagnética na região infravermelha e sendo transparente na parte visível do espectro, assim, rejeita a transferência de calor de fora para dentro no verão e vice-versa (Gustafsson *et al*., 2006).

A Figura 15 ilustra o princípio de funcionamento da FSS aplicada em projetos de janelas inteligentes.

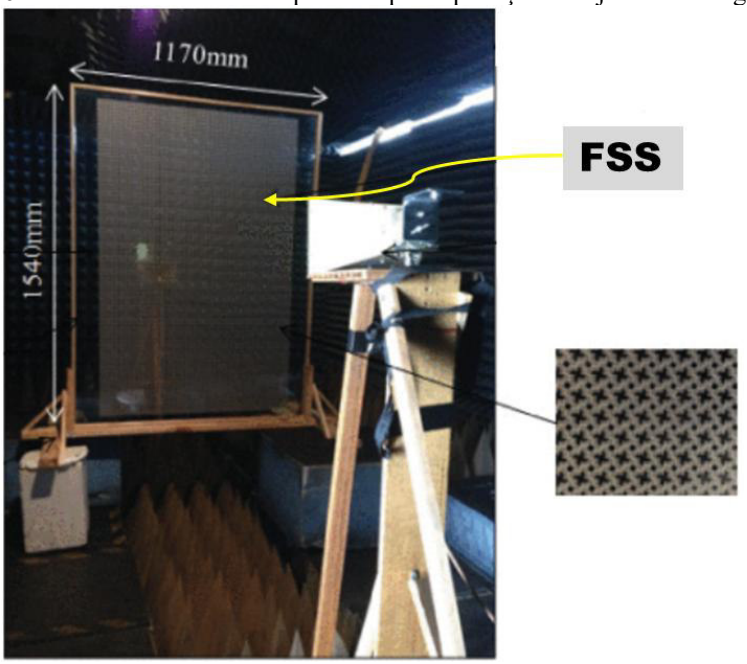
Figura 15 - Aplicação de FSS como janela inteligente.



Fonte: Adaptado de Gustafsson *et al.* (2006).

Dewani *et al.* (2018) projetaram uma FSS em um filme fino transparente para aplicação em janelas com intuito de otimizar a propagação das ondas eletromagnéticas, de forma que o projeto seja responsável pela diminuição das interferências e colisões de sinais, deixando as redes sem fio mais seguras. Adicionalmente, a utilização das FSS possibilita a blindagem contra sinais externos no local em determinadas faixas de frequência, promovendo o confinamento do sinal irradiado no interior do ambiente. A Figura 16 ilustra o projeto desenvolvido por Dewani *et al.* (2018).

Figura 16 - FSS em filme fino transparentes para aplicações em janelas inteligentes.



Fonte: Dewani *et al.* (2018).

2.2.4 FSS Aplicadas a Superestrato de Antenas

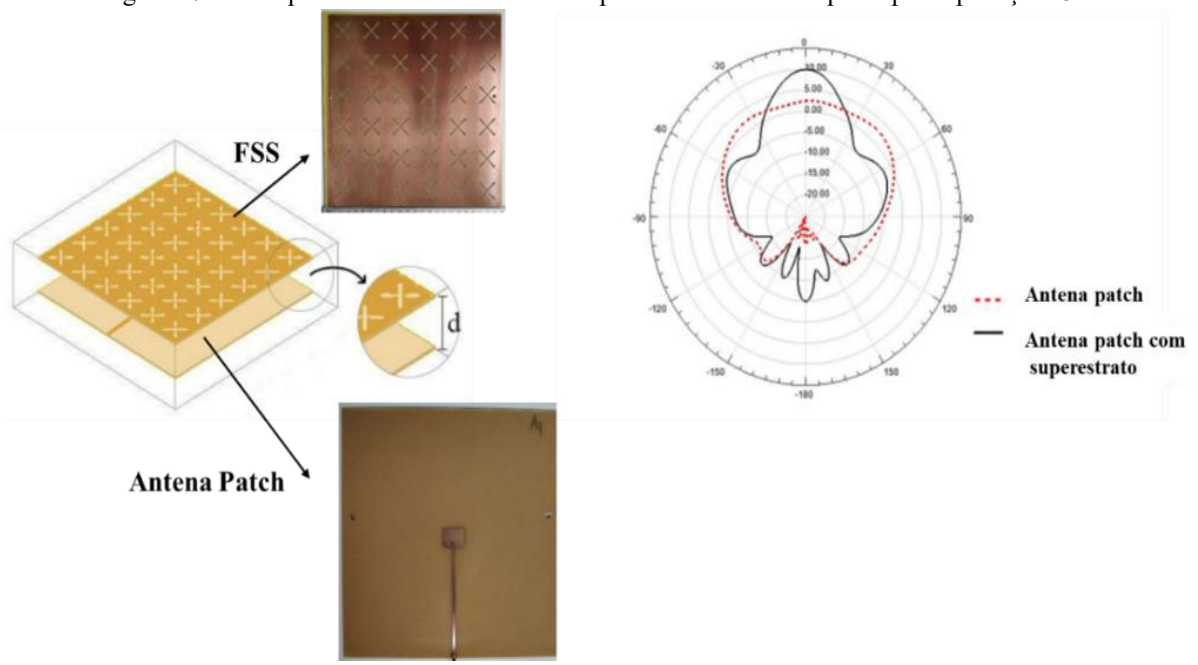
Diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas com o objetivo de projetar antenas mais eficientes, de modo a possibilitar uma melhoria na capacidade de transmissão entre os sistemas de comunicações, direcionando o sinal eletromagnético e favorecendo o uso do espectro, evitando que o sinal seja irradiado em direções indesejadas (Sievenpiper *et al.,* 2002).

Uma das técnicas usadas para minimizar as interferências e reduzir o consumo de energia é limitar o diagrama de irradiação da antena para uma região específica, ou mesmo mudar a sua direção; esse procedimento é conhecido como reconfiguração. Uma opção de direcionar o diagrama de irradiação é o uso de FSS passivas ou reconfiguráveis, como superestrato, com intuito de obter as características de radiação desejadas (Tsai; Hwang; Lin, 2012).

Evangelista, Gomes Neto e Serres (2021) propuseram uma antena *patch* como um superstrato de FSS do tipo passa-faixa, para aplicações 5G NR (*New Radio* – Novo Rádio) em 3,5 GHz. A FSS é baseada na geometria estrela de quatro braços. Foi observado o desempenho do superstrato em função da distância entre a antena *patch* e a FSS; com uma distância de 4,5 cm, houve uma melhoria no ganho de 5,74 dBi, aproximadamente $\lambda/2$.

A Figura 17 ilustra o projeto de FSS utilizado como superestrato, proposto por Evangelista, Gomes Neto e Serres (2021).

Figura 17 - Exemplo de FSS utilizada como superestrato em antena patch para aplicações 5G.

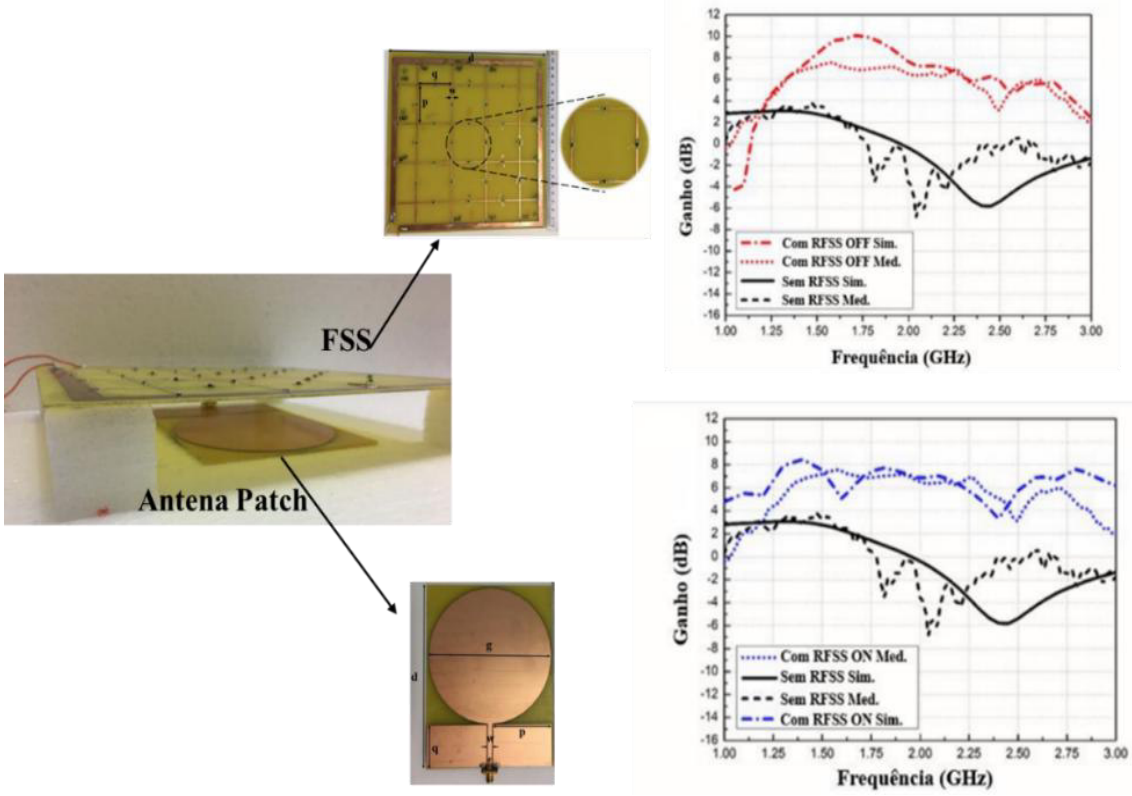


Fonte: Adaptado de Evangelista, Gomes Neto e Serres (2021).

Lucena (2018) usou uma Superfície Seletivas em Frequência Reconfigurável (RFSS) com diodos PIN, baseada na geometria de dipolos cruzados, como superestrato para aumentar o ganho em antenas. Foi usada uma antena *patch* circular UWB (*Ultra Wideband* – Banda Ultra Larga) e comutando os estados ON-OFF dos diodos, foi alcançada uma melhoria de cerca de 4 dB para o superstrato com polarização reversa na faixa de frequência. O ganho médio foi de 3 dBi e aumentou para 7 dBi para polarização direta e reversa.

Na Figura 18 pode ser visualizado o projeto da RFSS como superestrato proposto por Lucena (2018).

Figura 18 - FSS reconfigurável aplicada como superestrato para uma antena *patch* circular UWB.



Fonte: Adaptado de Lucena (2018).

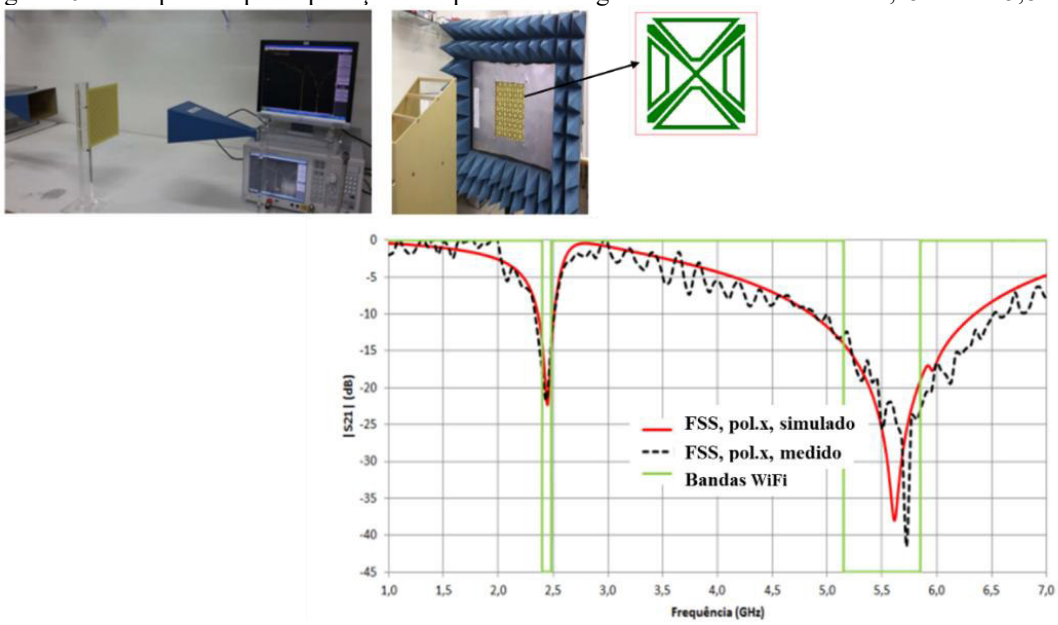
2.2.5 Paredes Inteligentes e Papel de Parede

As FSS passivas ou reconfiguráveis podem ser aplicadas a projetos de edifícios, também conhecidos como "*wireless building*", podendo ser instaladas em pisos, tetos, paredes, forros, janelas, entre outros. O principal intuito desses projetos é melhorar a propagação dos sinais de radiofrequência (RF), aumentando a eficiência e limitando a intensidade de sinais eletromagnéticos específicos em redes de comunicação sem fio em ambientes internos, bloqueando sinais indesejados, de modo a evitar interferências entre os sistemas, garantindo também uma maior segurança na transmissão de dados aos usuários (Sung; Sowerby; Williamson, 2008; Raspopoulos; Stavrou, 2011).

Gomes Neto *et al.* (2017) desenvolveram uma FSS passiva de banda dupla baseada na associação das geometrias estrela de quatro braços e anéis trapezoidais para aplicações em paredes inteligentes. O projeto cobriu as frequências correspondentes ao padrão Wi-Fi em 2,4 GHz e 5,8 GHz. Os resultados experimentais obtidos apresentaram um coeficiente de transmissão de pelo menos 15 dB de atenuação em cada banda de operação.

Na Figura 19 pode ser visualizada o projeto da FSS passiva para aplicações em paredes inteligentes proposta por Gomes Neto *et al.* (2017).

Figura 19 - FSS passiva para aplicações em paredes inteligentes na banda de Wi-Fi 2,45 GHz e 5,8 GHz.



Fonte: Adaptado de Gomes Neto *et al*. (2017).

Evangelista *et al.* (2023) apresentaram um projeto de uma RFSS para aplicação na banda de 2400 MHz a 2483,5 MHz, padrão IEEE 802.11b/g/n (Wi-Fi). A RFSS proposta é baseada na geometria estrela de quatro braços e diodos PIN foram usados como elementos de comutação. A reconfigurabilidade da RFSS é confirmada, com uma variação de pelo menos 15 dB na resposta da estrutura ao alternar os estados (ON-OFF) do diodo PIN. O projeto proposto, além de controlar o sinal de Wi-Fi, tem possibilidades de aplicações em antenas reconfiguráveis.

Na Figura 20 pode ser visto o projeto da RFSS para aplicação na na banda de 2400 MHz a 2483,5 MHz desenvolvido por Evangelista *et al.* (2023).

Figura 20 - RFSS para aplicação em 2400-2483,5 MHz (Wi-Fi).

Fonte: Adaptado de Evangelista *et al*. (2023).

Kiermeier e Biebl (2007) buscaram implementar projetos de FSS em paredes de edifícios já existentes, por meio da impressão de padrões metálicos em um substrato dielétrico fino (filme fino ou papel de parede), que são fixados diretamente na parede de maneira a rejeitar uma ou mais faixas de frequência, como por exemplo, WLAN (*Wireless Local Area Network* - Rede Local Sem Fios) em 2,4 GHz e/ou 5,8 GHz, enquanto permitem a propagação de sinais de celulares GSM e 3G/4G além de sinais de emergência em ambientes internos. Projetos como esse são essenciais em locais onde se exige um alto nível de segurança nas comunicações, tais como consulados, presídios, grandes corporações, salas de cirurgia, entre outros. Nesses ambientes, torna-se praticamente mandatória a restrição ao uso de comunicações sem fio.

A Figura 21 é ilustra o projeto de uma FSS passiva do tipo *patch* projetada como um papel de parede seletivo aplicada ao bloqueio de sinais GSM, desenvolvido por Kiermeier e Biebl (2007).

Figura 21 - FSS passiva aplicada como papel de parede seletivo para bloqueio de sinais GSM.

Fonte: Adaptado de Kiermeier; Biebl (2007).

No entanto, uma das principais limitações na utilização de FSS convencionais do tipo *patch*, como papel de parede, reside na geração de reflexões intensas a partir de sua superfície, o que pode comprometer a eficácia de seu desempenho. Para mitigar esse problema, nos últimos anos, tem havido um crescente interesse por parte dos pesquisadores em projetos que envolvem estruturas absorvedoras utilizando FSS. Estas estruturas são projetadas para absorver os sinais em vez de refleti-los, o que representa uma abordagem promissora para reduzir as reflexões

indesejadas e melhorar a eficiência global do sistema (Anwar; Mao; Ning, 2018; Nóbrega, 2013).

No tópico a seguir serão abordados os conceitos, características, propriedades e as principais aplicações das estruturas absorvedoras de micro-ondas, assim como projetos envolvendo a utilização de diferentes tipos de estruturas absorvedoras.

2.3 Absorvedores de Micro-Ondas

De acordo com Kundu, Mohan e Chakrabarty (2016), os absorvedores, por definição, são filtros espaciais que não transmitem nem refletem sinais eletromagnéticos de uma faixa específica de frequência. A maior parte dos projetos de absorvedores eletromagnéticos são utilizados na redução de assinatura de radar, redução de interferência eletromagnética (EMI - *Electromagnetic Interference*), materiais de absorção de radar (RAM - *Radar Absorbing Materials*) em tecnologia *stealth* (técnicas de baixa detecção, que se dão especialmente pela presença de materiais absorvedores e projeto com uma geometria que dificulte a detecção de aeronaves militares), entre outros. Contudo, essas aplicações exigem um baixo perfil (espessura mínima) e uma largura de banda máxima com certo nível de redução de reflexão.

Maia (2022) e Silva (2014) destacam que os absorvedores eletromagnéticos, em sua forma convencional, convertem em calor a maior parte da energia eletromagnética incidente sobre eles, ou seja, transferem a energia da onda incidente para o material. Consequentemente, com essas estruturas, é possível absorver sinais resultantes de ondas operando em uma única banda ou distintas faixas com múltiplas bandas de frequência. Nesse contexto, Silva (2014) destaca que absorvedores com diferentes formas, geometrias, materiais, coberturas com simples e múltiplas camadas têm sido desenvolvidos por diversos grupos de pesquisa no mundo.

Souza (2021) destaca que, com o surgimento de novos sistemas de comunicações sem fio, os ambientes estão propícios a uma poluição eletromagnética proveniente dos dispositivos eletrônicos usados no cotidiano. Tal fato pode ocasionar EMI em outros dispositivos eletrônicos. Para minimizar isso, existem diferentes estratégias para a mitigação da EMI, uma delas é o uso de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE), que podem ser usados como um material uniforme ou uma estrutura multicamada. Nesse caso, as estruturas multicamadas são compostas pelo arranjo de amostras de distintos materiais e espessuras, sendo uma opção para se obter melhores resultados de refletividade.

Folguera e Rezende (2008) ressaltam que quando as ondas eletromagnéticas atingem as estruturas absorvedoras de radar (RAS - *Radar Absorbing Structures*), sofrem excitação

molecular em decorrência das suas propriedades físico-químicas e acabam convertendo parte da energia de radiação eletromagnética em energia térmica, propiciando um baixo nível de reflexão na faixa de frequência indicada.

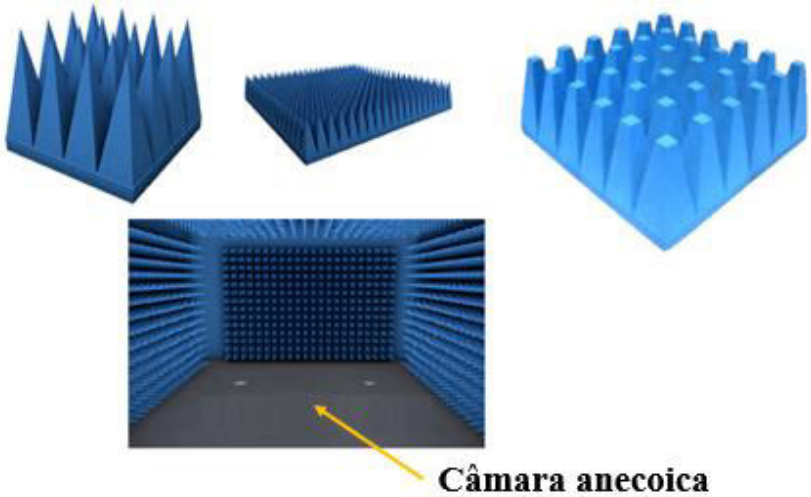
Nas investigações sobre absorvedores de micro-ondas, diversas análises são realizadas, abrangendo o estudo do acoplamento da energia eletromagnética em diferentes contextos, como propagação no espaço livre, em guias de onda, linhas coaxiais ou outros ambientes confinados. Nesse cenário, destaca-se a técnica de casamento de impedâncias no espaço livre combinada ao uso de absorvedores multicamadas. Essa abordagem consiste na sobreposição de camadas de materiais de baixa perda com materiais de alta perda, permitindo que as ondas refletidas entre as camadas gerem interferência destrutiva. Exemplos clássicos dessa técnica incluem os absorvedores convencionais de tela de Salisbury, Jaumann e Dallenbach (Peixoto Neto, 2022; Maia, 2022).

Na literatura são encontradas variadas classificações para as estruturas absorvedoras. Umas das principais é a classificação quanto a banda de absorção, que pode ser banda estreita ou larga. Dentro dessa classificação estão os absorvedores do tipo N ou de banda ressonante, que são utilizados em uma faixa estreita de absorção ou quando se deseja absorver/reduzir apenas uma frequência específica e os do tipo W, ou banda larga, que são aplicados quando se quer trabalhar uma grande banda de atuação ou várias faixas de frequências (Silva; Araujo; Campos, 2018; Costa; Monorchio; Manara, 2010).

Tak e Choi (2017) enfatizam que os absorvedores eletromagnéticos (EMA - *Electromagnetic Absorbers*) são classificados em três tipos:

- **Absorvedores cônicos ou piramidais:** são formados por um arranjo de pirâmides que operam em condições do espaço livre com a finalidade de absorver ondas propagadas, apresentando características de absorção e dispersão das ondas em banda larga e são comumente usados em câmaras anecoicas. No entanto, este tipo de absorvedor é volumoso e frágil e, portanto, não é adequado para aplicações portáteis. Exemplos de absorvedores piramidais usados em câmara anecoica são ilustrados na Figura 22.

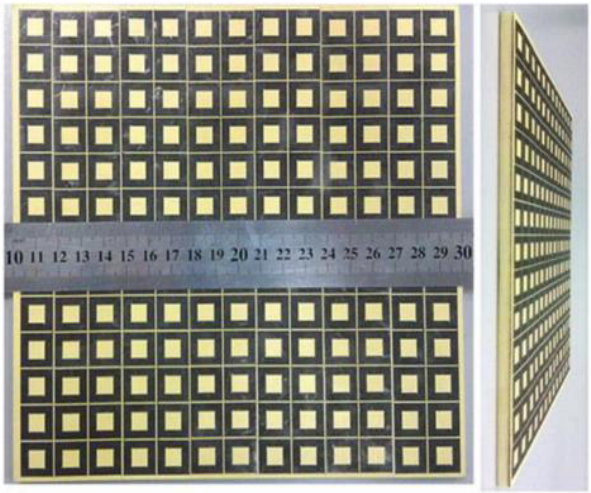
Figura 22 – Exemplo de absorvedores piramidais usados em câmaras anecoicas.



Fonte: Adaptado de Holland Shielding (2023).

- **Absorvedores eletromagnéticos do tipo com perdas (também conhecidos por ressonantes ou sintonizados):** são formados por estruturas com características de alta permissividade elétrica ou permeabilidade magnética, que exibem absorção em banda larga e sua espessura é um dos parâmetros primordiais no projeto. Na Figura 23 é apresentado um exemplo de um absorvedor planar de banda tripla com uma superfície de alta impedância (HIS - *High Impedance Surface*) desenvolvida por Zhang *et al.* (2013). A estrutura do absorvedor é composta de uma espuma de poliuretano posicionada entre uma folha com perdas de FSS e um condutor elétrico perfeito. As perdas na FSS são introduzidas pela impressão do padrão de anel quadrado feitas com uso de várias tintas resistivas.

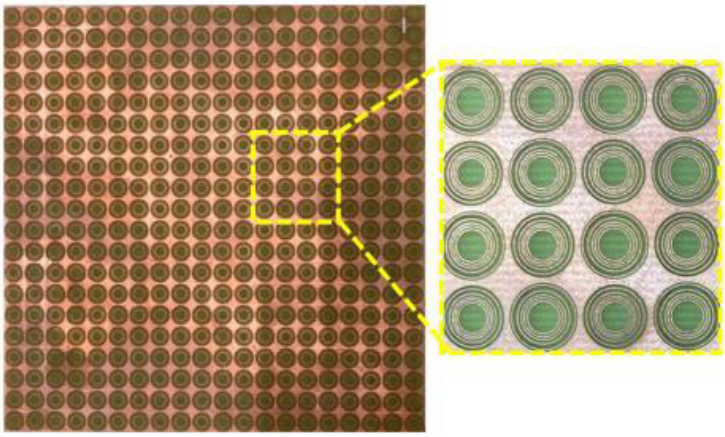
Figura 23 - Exemplo de um absorvedor eletromagnético do tipo com perdas.



Fonte: Zhang *et al.* (2013).

- **Absorvedores de metamateriais:** são empregados em projetos que requerem flexibilidade e/ou baixo perfil e menor volume. Os absorvedores baseados em metamateriais são estruturas eletromagnéticas artificiais periódicas, formadas por arranjos metálicos dispostos em dielétricos específicos com características negativas de permissividade elétrica, permeabilidade magnética e índice de refração. Os absorvedores baseados em metamateriais de baixo perfil têm recebido atenção dos pesquisadores nas últimas décadas em virtude das várias aplicações potenciais, entre elas, as aplicações em tecnologia *stealth*, como por exemplo, redução de seção transversal de radar (RCS - *Radar Cross Section*). Um exemplo de um absorvedor baseado em metamaterial usando geometria de ressonador de anéis circulares múltiplos é ilustrado na Figura 24. A estrutura ressoa em 11 frequências de 9 GHz a 20 GHz. A estrutura consiste em dez diferentes ressonadores de anel fechado no substrato dielétrico aterrado e um *patch* quadrado com fenda circular que ressoa com a maior frequência de absorção. O absorvedor apresentado tem aplicações em compatibilidade eletromagnética (EMC - *Electromagnetic Compatibility*) e EMI (Shukoor; Dey; Koul, 2021). Posteriormente, serão abordados mais detalhes sobre projetos que usam metassuperfícies absorvedoras.

Figura 24 - Exemplo um absorvedor baseado em metamaterial para aplicações em EMC/EMI.



Fonte: Shukoor; Dey; Koul (2021).

Kundu, Mohan e Chakrabarty (2016) e Choi *et al.* (2015) apontam alguns fatores determinantes para a escolha do tipo de absorvedor, entre eles destacando-se a intensidade em que se pretende absorver ou atenuar o sinal da onda incidente, a faixa de frequência de operação e os aspectos estruturais do projeto. Entre as limitações listadas pelos autores estão o material dielétrico, espessura e peso das estruturas, as respostas de largura de banda, largura de absorção e o nível de refletividade na banda de operação.

Segundo Maia (2022), parâmetros como a largura de banda de absorção são primordiais no desenvolvimento de estruturas absorvedoras de micro-ondas, tendo em vista que esse parâmetro vem da necessidade de absorver uma ampla faixa de frequência dos dispositivos e está diretamente relacionado à espessura e peso do absorvedor.

Knott, Schaeffe e Tulley (2004) e Nohara (2003) salientam que o nível de refletividade da estrutura absorvedora determina sua eficiência, sendo este definido pela diferença entre a impedância do espaço livre e a impedância da estrutura, levando-se em consideração a posição normal ou oblíqua do ângulo de incidência da onda eletromagnética sobre a superfície absorvedora. Além disso, é levado em consideração suas respectivas geometrias e as características dos materiais, tais como a permissividade elétrica e permeabilidade magnética.

Tendo em consideração que a propagação da onda eletromagnética depende da permissividade elétrica e permeabilidade magnética relativa do meio, pode-se descrever a forma complexa (Merdan, 2018; Hayt Jr, 2012; Balanis, 2015):

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0 \, (\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'') \tag{1}$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' = \mu_0 \, (\mu_r' - j\mu_r'') \tag{2}$$

em que, ε_r e μ_r são, respectivamente, a permissividade elétrica e permeabilidade magnética relativa normalizada pelos valores de ε_0 e μ_0. As componentes reais da grandeza, ε_r' e μ_r', correspondem ao armazenamento da energia e as partes imaginárias ε_r'' e μ_r'', equivalem às perdas.

Dessa forma, a tangente de perdas é a característica expressa pelas componentes imaginárias de permissividade elétrica e permeabilidade magnética do material e pode ser descrita como (Merdan, 2018; Hayt Jr, 2012; Balanis, 2015):

$$tan\delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \tag{3}$$

$$tan\delta_\mu = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \tag{4}$$

em que, δ_ε e δ_μ são os argumentos das tangentes de perdas elétricas e magnéticas. As características elétricas dos absorvedores estão relacionadas à condutividade do material. Desse modo, as perdas são expressas como (Merdan, 2018; Hayt Jr, 2012; Balanis, 2015):

$$\varepsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega}\varepsilon_0 \tag{5}$$

em que, σ é a condutividade e o ω é a frequência angular. De maneira equivalente, tem-se a seguinte representação na forma polar (Merdan, 2018; Hayt Jr, 2012; Balanis, 2015):

$$\varepsilon_r = |\varepsilon_r| e^{j\delta_\varepsilon} \tag{6}$$

$$\mu_r = |\mu_r| e^{j\delta_\mu} \tag{7}$$

A impedância intrínseca Z é definida como a relação da permissividade elétrica e permeabilidade magnética relativa, caracteriza-se pela onda eletromagnética incidente normal ao material, como visto em (Merdan, 2018; Hayt Jr, 2012; Balanis, 2015):

$$Z = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tag{8}$$

em que Z_0 corresponde à impedância intrínseca do espaço livre igual a 377 Ω. Nos projetos, usualmente é empregado a camada do dielétrico sobre superfícies condutoras. Desta maneira, usando o método de análise de linha de transmissão, a impedância de entrada característica ou impedância normalizada é dada como (Merdan, 2018; Hayt Jr, 2012; Balanis, 2015):

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\, tanh\,(-jk_0 d\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}) \tag{9}$$

em que o valor de d correspondente à espessura da camada do dielétrico e o k_0 é equivalente ao número de onda característico de propagação da onda no vácuo (Merdan, 2018; Hayt Jr, 2012; Balanis, 2015):

$$k_0 = \omega\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \tag{10}$$

Para análise em linha de transmissão, o coeficiente de reflexão em uma interface, Γ, pode ser obtido como (Merdan, 2018; Hayt Jr, 2012; Balanis, 2015):

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \tag{11}$$

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{Z_{in}}{Z_0} - 1\right)}{\left(\frac{Z_{in}}{Z_0} + 1\right)} \tag{12}$$

No qual, $\Gamma = 0$, irá corresponder a Z_{in}=Z_{out}, ou seja, a impedância na carga é igual a impedância na linha, consequentemente, não haverá onda refletida para camada externa. O coeficiente de reflexão, em decibéis, é dado por (Merdan, 2018; Hayt Jr, 2012; Balanis, 2015):

$$|\Gamma|(dB) = 20log_{10}|\Gamma| \tag{13}$$

O coeficiente de reflexão ($|\Gamma|$) desempenha um papel fundamental no projeto de absorvedores, uma vez que a eficácia da estrutura depende da utilização de materiais com coeficiente de reflexão próximo a zero ao longo de uma ampla faixa de frequência para garantir um bom desempenho na absorção das ondas eletromagnéticas. Entretanto, a obtenção de um casamento de impedância ideal entre o absorvedor e o meio incidente representa um desafio, especialmente devido às limitações práticas e aos altos custos associados ao desenvolvimento de materiais com permissividade elétrica e permeabilidade magnética específicas. Como alternativa, os projetistas frequentemente recorrem ao uso de materiais isotrópicos combinados com estratégias geométricas, como a modificação das dimensões e formas das estruturas. Um exemplo comum é a utilização de arranjos empilhados em múltiplas camadas, que permitem otimizar a resposta eletromagnética do sistema, promovendo altos coeficientes de transmissão e baixos coeficientes de reflexão, o que resulta em uma absorção eficiente por meio de mecanismos de perdas dielétricas ou ôhmicas (Maia, 2022).

A equação usada para o cálculo da absorção leva em consideração o coeficiente de reflexão e o coeficiente de transmissão e é dada por (Hannan *et al*., 2021; Faniayeu; Asadchy; Fanyaev, 2020):

$$\mathrm{A}\ (\omega) = 1 - \mathrm{R}\ (\omega) - \mathrm{T}\ (\omega) = 1\ - |\mathrm{S}_{11}|^2\ - |\mathrm{S}_{21}|^2 \tag{14}$$

Em que, A é a taxa de absorção e de acordo com a equação (14), a taxa de absortividade é maximizada quando a transmissão e a reflexão têm valores mínimos ao mesmo tempo. Para uma análise mais precisa do desempenho dos absorvedores, é fundamental considerar as componentes de reflexão co-polarizada e cruzada na determinação da refletância R (ω) e da transmitância T (ω) conforme descrito a seguir:

$$R\,(\omega) = |S_{11}|^2 = |R_{xx}|^2 + |R_{yx}|^2 = |S_{11,xx}|^2 + |S_{11,yx}|^2 \quad (15)$$

$$T(\omega) = |S_{21}|^2 = |T_{xx}|^2 + |T_{yx}|^2 = |S_{21,xx}|^2 + |S_{21,yx}|^2 \quad (16)$$

Substituindo as equações (15) e (16) na equação (14), obtém-se a expressão expandida da taxa de absorção, conforme na equação (17):

$$A\,(\omega) = 1 - [|R_{xx}|^2 + |R_{yx}|^2] - [|T_{xx}|^2 + |T_{yx}|^2] \quad (17)$$

Contudo, quando a estrutura absorvedora possui o plano de terra completo ocorre uma restrição completa da transmissão das ondas eletromagnéticas em que o valores de $T\,(\omega) = |S_{21}|^2 \rightarrow 0$ e, então, a equação (14) é reescrita para Equação (18), em que, os componentes co e polarizadas cruzadas são representados por *xx* e *yx*, respectivamente (Faniayeu; Asadchy; Fanyaev, 2020):

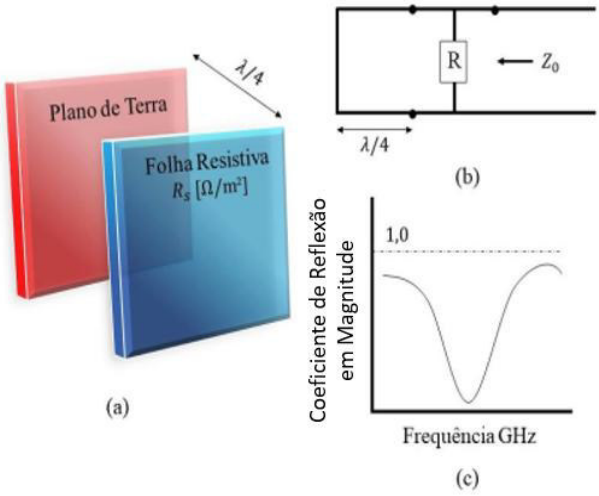
$$A = 1 - R\,(\omega) = 1 - [|R_{xx}|^2 + |R_{yx}|^2] \quad (18)$$

2.4 Absorvedores Convencionais

Os absorvedores clássicos ou convencionais têm o funcionamento baseado na tela de Salisbury (Fante; Mccormack, 1988) ou absorvedores Jaumann multicamadas (Du Toit, 1994). A tela de Salisbury foi patenteada pelo engenheiro americano Winfield Salisbury, em 1952. No início, sua aplicação foi destinada à área militar para a redução da seção reta de radar.

O absorvedor de Salisbury é do tipo passivo e é composto por uma única camada de uma tela resistiva caracterizada por uma resistência superficial homogênea acima de um plano de terra metálico, a uma distância de $\lambda/4$. Geralmente, o plano de terra é usado na parte de trás para evitar qualquer ambiguidade que possa ser causada por qualquer objeto localizado atrás das camadas de absorção. A Figura 25 ilustra a configuração de um absorvedor convencional baseado na tela de Salisbury.

Figura 25 - Tela de Salisbury: (a) geometria (b) circuito equivalente (c) desempenho.



Fonte: Maia (2022).

O mecanismo de absorção na tela de Salisbury acontece quando a onda incidente sobre a estrutura se divide em duas, com o mesmo comprimento de onda. A folha resistiva reflete uma parte da energia e outra parte passa sobre o espaçador de $\lambda/4$ e é refletida no plano terra. As ondas refletidas interferem e cancelam os campos elétricos umas das outras. Tendo em vista que o plano metálico é eletricamente perfeito, seu comportamento é de um curto-circuito, com a distância de $\lambda/4$. Neste sentido, o curto-circuito se torna um circuito aberto e a impedância de entrada é descrita como (Chambers, 1994; Charles; Mccowen, 1999).

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{R_S} + \frac{1}{\infty} \tag{19}$$

em que Z_{in} corresponde à impedância de entrada e R_S a resistividade superficial. Por conseguinte, a absorção total da onda incidente ocorre quando, a resistividade superficial do material tem um valor de 377 Ω, ou seja, o casamento de impedância depende principalmente da resistividade superficial da folha resistiva, descrita como (Chambers, 1994; Charles; Mccowen, 1999):

$$Z_{in} = R_S \tag{20}$$

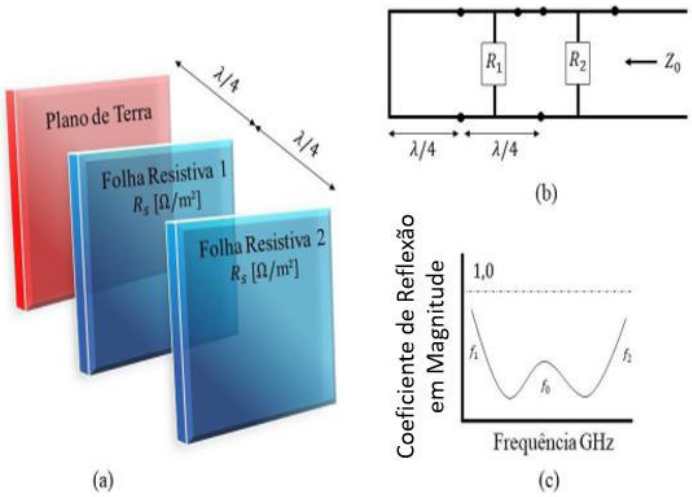
Entre as principais vantagens da tela de Salisbury destacam-se a simplicidade no desenvolvimento e fabricação dos protótipos, além do baixo custo de fabricação. Por outro lado, as desvantagens estão associadas ao perfil estrutural elevado, resultante do espaçamento de um

quarto do comprimento de onda, e à limitação de banda estreita (Kundu; Mohan; Chakrabarty, 2016; Seman *et al.,* 2011).

O absorvedor Jaumann é formado por duas ou mais camadas resistivas dispostas na frente de um plano de terra. As camadas são separadas por uma região dielétrica de aproximadamente $\lambda/4$ de espessura, tomando como referência as respectivas placas na frequência central. Dessa maneira, o absorvedor Jaumann é muitas vezes considerado uma extensão da tela de Salisbury. Historicamente, os absorvedores Jaumann foram inventados por J. Jaumann durante a II Guerra Mundial na Alemanha e, aparentemente, foram utilizados especialmente para redução da seção reta de radomes de *snorkels* e periscópios submarinos (Du Toit, 1994).

. A Figura 26 ilustra a configuração de um absorvedor convencional baseado no absorvedor Jaumann.

Figura 26 - Absorvedor Jaumann: (a) geometria (b) circuito equivalente (c) desempenho.



Fonte: Maia (2022).

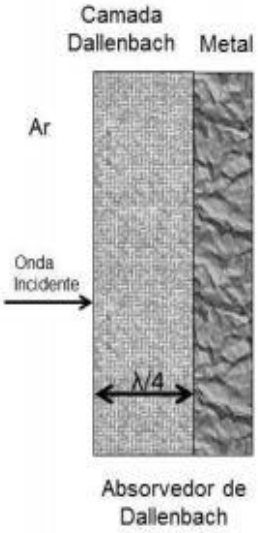
A desvantagem do absorvedor Jaumann reside em seu perfil estrutural elevado, devido à presença de múltiplas camadas separadas por um quarto de comprimento de onda, além do plano de terra. Sua principal vantagem é a ampla largura de banda; no entanto, isso acarreta uma espessura excessiva devido ao espaçamento de um quarto de comprimento de onda (Kundu; Mohan; Chakrabarty, 2016; Seman *et al*., 2011).

Um terceiro tipo de absorvedor amplamente referenciado na literatura é o absorvedor de Dallenbach. Essa configuração é caracterizada por sua simplicidade estrutural, composta por uma única camada de material de alta perda eletromagnética disposta sobre um plano condutor metálico. Diferentemente de outras abordagens, esse absorvedor não utiliza camadas resistivas,

mas sim materiais com propriedades intrínsecas de atenuação. Para sua implementação, são empregados diferentes tipos de materiais dielétricos ou híbridos combinando características dielétricas e magnéticas com variadas composições químicas e parâmetros eletromagnéticos ajustáveis. Contudo, os materiais devem possuir a parte imaginária da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética adequadas à absorção desejada. O emprego de materiais magnéticos auxilia na redução da espessura e na obtenção de uma ampla banda de absorção. No entanto, o peso da estrutura e o custo se tornam elevados. Na condição de absorção, o absorvedor de Dallenbach está diretamente associado à impedância de entrada do meio absorvedor, que deverá estar casada, ou parcialmente casada com o meio externo (Tong, 2016).

A configuração esquemática de um absorvedor de Dallenbach é apresentada na Figura 27.

Figura 27 - Modelo do absorvedor Dallenbach.



Fonte: Adaptado de Maia (2022).

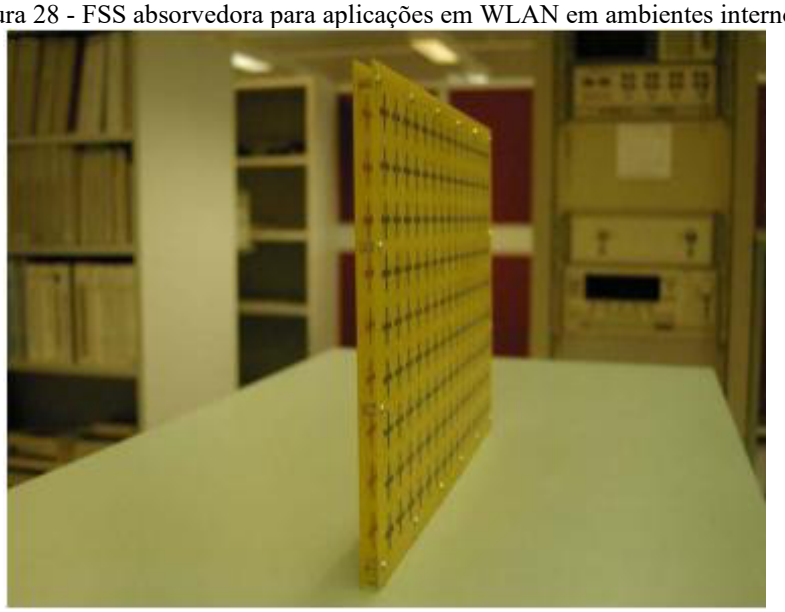
2.5 Absorvedor FSS

O progresso no campo de sistemas de radar e comunicação fez com que os projetos de absorvedores de micro-ondas se modernizassem. A fim de obter uma estrutura de banda mais ampla com uma espessura de substrato reduzida, as FSS foram introduzidas no projeto de absorvedores. O desempenho dos absorvedores planos baseados em FSS foi melhorado por meio da substituição do padrão resistivo homogêneo, existente nos absorvedores convencionais, pelo padrão de FSS (Seman *et al.*, 2011; Munk, 2000).

Esse padrão pode ser de natureza condutiva ou resistiva. Além disso, a distância mínima do material dielétrico pode atingir um valor menor do que um quarto do comprimento de onda, restrita à tela de Salisbury. Outro ponto a ser destacado é que a resposta de largura de banda de absorção pode ser otimizada variando-se os parâmetros das FSS sem que haja a necessidade de interferir no tamanho da estrutura, o que seria uma limitação nos absorvedores do tipo Jaumann (Seman *et al.,* 2011; Munk, 2000).

Na Figura 28, pode ser visto um exemplo de uma aplicação de uma FSS absorvedora. A estrutura é formada por duas FSS em cascata, baseada na geometria de dipolos cruzados, na qual uma das camadas é formada por padrões metálicos convencionais e a outra é composta por elementos de natureza resistiva. O projeto possui boas características de rejeição/absorção para sinais WLAN, enquanto permite a passagem de sinais de telefonia móvel quase sem atenuações. Esta aplicação pode restringir a propagação multipercurso, o atraso de propagação e a degradação dos sinais WLAN causada em ambientes internos por paredes seletivas de frequência com elementos metálicos (Kiani; Weily; Esselle, 2006).

Figura 28 - FSS absorvedora para aplicações em WLAN em ambientes internos.

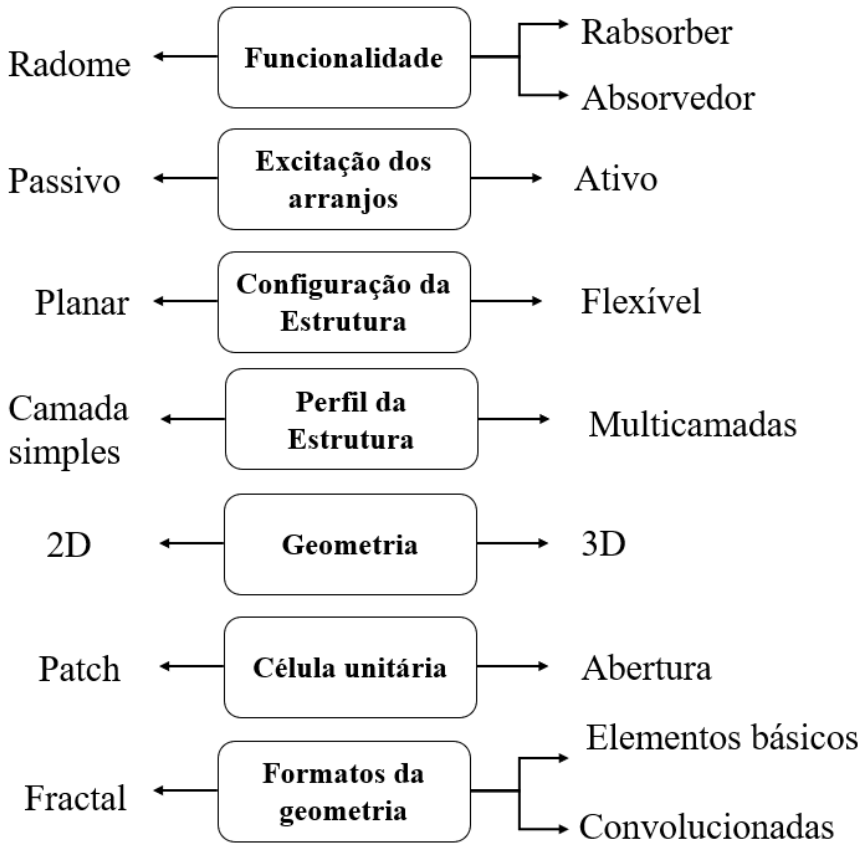


Fonte: Kiani; Weily; Esselle (2006).

Nas últimas décadas, vários estudos relacionados aos absorvedores baseados em FSS foram realizados, tais como absorvedores multibanda, insensíveis à polarização e de banda larga para aplicações potenciais em redução de seção reta de radar, Wi-Fi, captação de energia de micro-ondas, entre outras, podendo ser do tipo passivo ou reconfigurável e absorvedores flexíveis e/ou transparentes (Maia *et al.,* 2022; Bakshi; Mitra; Ghosh, 2018; Dincer *et al.,* 2014; Lai *et al.,* 2018; Wu *et al.,* 2019; Malik *et al.,* 2019; Areias *et al*., 2020).

A Figura 29 ilustra um resumo das diferentes configurações de projetos de absorvedores baseados em FSS listado por Bajaj, Kundu e Singh (2023).

Figura 29 - Configurações de projetos de absorvedores FSS.

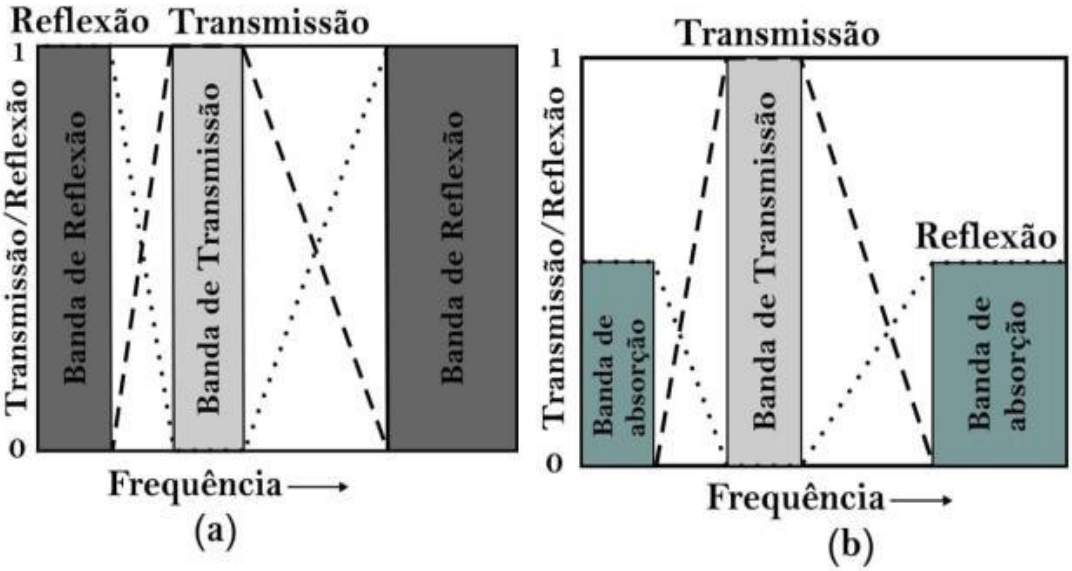


Fonte: Adaptado de Bajaj, Kundu e Singh (2023).

Anwar, Mao e Ning (2018) ressaltam que, geralmente, os absorvedores FSS apresentam características de alta reflexão na banda desejada e, quando são integrados a configurações de absorvedores, os valores de reflexão são reduzidos em algumas faixas de frequência, alcançando valores próximos de zero, o que caracteriza a absorção do sinal.

Na Figura 30 (a), pode ser visualizado o funcionamento de uma estrutura FSS convencional, enquanto na Figura 30 (b) está a FSS com característica de absorvedor. Observa-se que, por meio da união das configurações, as ondas eletromagnéticas são absorvidas em vez de refletidas, e a absorção ocorre em faixas de frequência distintas, conservando a banda de transmissão.

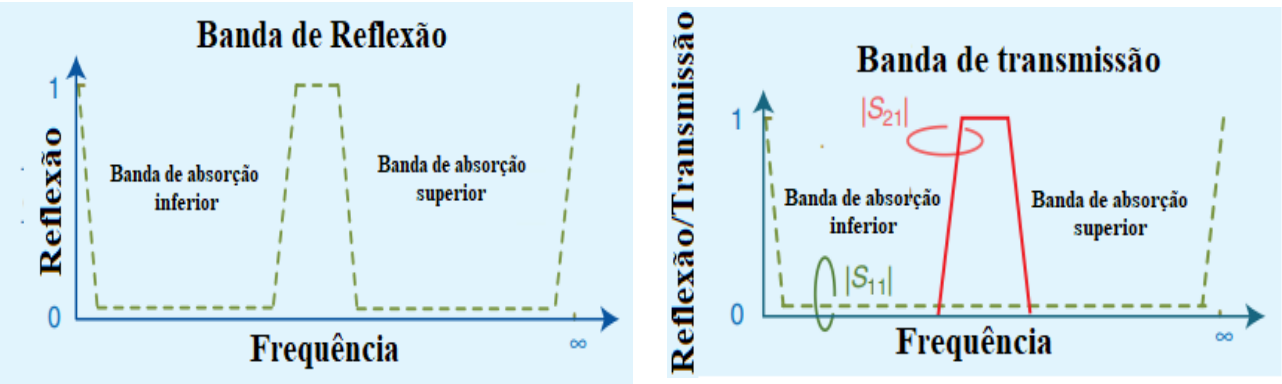
Figura 30 - Absorvedor FSS: (a) Configuração de FSS (b) FSS com característica de absorvedor.



Fonte: Adpatado de Anwar, Mao e Ning (2018).

Quanto à sua classificação, os absorvedores FSS podem ser projetados com características de transmissão e reflexão. Dessa forma, o projeto de uma FSS absorvedora faz uso das duas configurações de projeto, geralmente denominadas estruturas de reflexão/transmissão seletivas em frequência (AFSR/T - *Absorptive Frequency-Selective Reflection/Transmission*). A estrutura do AFSR tem uma banda de reflexão com bandas de absorção de um ou dois lados, enquanto a estrutura do AFST tem uma banda de transmissão dentro de uma banda de absorção ampla (Omar; Huang; Shen, 2019; Anwar; Mao; Ning, 2018). A Figura 31 (a) e (b) ilustra as respostas típicas de estruturas absorvedoras do tipo AFSR e AFST.

Figura 31 - Respostas típicas de estruturas AFSR e AFST: (a) Coeficiente de reflexão para uma estrutura AFSR (b) Coeficientes de reflexão e transmissão para a estrutura AFST.



(a) (b)

Fonte: Adaptado de Omar; Huang; Shen (2019).

De acordo com Omar, Huang e Shen (2019), AFSR (*Absorptive Frequency-Selective Reflection*) são encontradas como: estruturas com bandas de reflexão única e múltipla, estruturas que usam resistores concentrados, absorvedores comerciais entre outros. Já os projetos de AFST (*Absorptive Frequency-Selective Transmission*) são encontrados como: estruturas com uma resposta com bandas de absorção unilaterais e bandas de absorção bilaterais com um *design* ajustável. Do ponto de vista estrutural, elas podem ser encontradas da seguinte maneira:

- AFST são divididas em dois tipos: (1) aquelas com camadas FSS 2D em cascata e (2) aquelas que empregam o conceito FSS 3D. Podendo ainda ser classificadas em três categorias do ponto de vista de desempenho: (3) com uma banda de absorção unilateral com uma banda de transmissão inferior, (4) com uma banda de absorção unilateral com uma banda de transmissão superior e (5) com bandas de absorção nos dois lados.

- AFSR são divididas em duas categorias: (1) camadas de FSS 2D ou 3D em cascata e (2) conexão em série ou circuito analógico – resistores concentrados ou uso de materiais absorvedores (tintas, filmes finos, entre outros).

No método de cascata de FSS, as partes de absorção e reflexão são projetadas separadamente, o que torna o projeto da estrutura simples. Enquanto isso, no método de conexão em série ou de circuito analógico, as partes de absorção e reflexão são desenvolvidas simultaneamente, tornando o projeto mais complexo do que o do método em cascata (Omar; Huang; Shen, 2019).

A técnica que envolve o uso de resistores concentrados ou o emprego de materiais absorventes tem desvantagens, tais como, custo elevado, especialmente quando se emprega resistores de alta frequência; seus efeitos parasitas são imprevisíveis devido ao próprio componente ou à qualidade da soldagem, e seu valor provavelmente mudará com o tempo. No entanto, é mais leve e compacta. A principal desvantagem do uso de material absorvente é seu alto volume, no caso dos absorvedores dielétricos, ou seu peso, no caso dos absorvedores magnéticos (Omar; Huang; Shen, 2019).

2.6 Metassuperficies Absorvedoras

As metassuperfícies são versões bidimensionais (2D), ou planares, dos metamateriais tridimensionais (3D), que são definidos como materiais artificiais com valores de permissividade elétrica e/ou permeabilidade magnética e índice de refração negativo. Essas estruturas são amplamente investigadas na literatura devido a suas aplicações na área de engenharia de telecomunicações e em aplicações militares, principalmente por suas características de menor peso, espessura, facilidade de integração em outros dispositivos e baixo custo de fabricação, em comparação com os metamateriais 3D. As metassuperfícies podem bloquear, absorver, concentrar, dispersar ou guiar ondas eletromagnéticas, atuando em faixas de frequência desde micro-ondas até frequências visíveis (Aobo; Singh; Sievenpiper, 2018; Bukhari; Vardaxoglou; Whittow, 2019).

Já Yu e Capasso (2014) definem as metassuperfícies como sendo estruturas ou matrizes periódicas ou aperiódicas, simétricas ou assimétricas, em que a espessura e a periodicidade dos elementos individuais são pequenas em comparação com o comprimento da onda de operação.

Nesse sentido, Cui, Smith e Liu (2010) destacam que, se a estrutura metamaterial for considerada como um meio efetivo (detalhes no Capitulo 3), é importante ressaltar que o tamanho da célula deve ser igual ou inferior ao subcomprimento de onda, ou seja, o subcomprimento de onda está relacionado às dimensões em uma escala menor do que o próprio comprimento de onda associado a uma onda eletromagnética específica. Os autores explicam que os metamateriais de micro-ondas são produzidos utilizando placas de circuito impresso (PCI), o que possibilita a criação de diversas configurações de células unitárias metálicas em PCI.

Conforme salientado pelos autores, as propriedades desses metamateriais são predominantemente derivadas da geometria da célula básica, além de dependerem dos substratos diéletricos, que podem incluir materiais como FR-4, F4B, Rogers, entre outros. A influência das propriedades dos metamateriais na geometria da célula unitária oferece uma flexibilidade considerável para o controle desses materiais (Cui; Smith; Liu, 2010).

Essa flexibilidade pode resultar na colocação de um número significativamente maior de células unitárias em um espaço restrito, o que se mostra vantajoso para aplicações como radomes com limitações espaciais. Além disso, essa abordagem proporciona uma maior estabilidade angular, aprimorando o desempenho global dos metamateriais (Cui; Smith; Liu, 2010).

Falcone (2004) salienta que as metassuperfícies geralmente são projetadas com o auxílio dos ressonadores de anéis fendidos (SRRs) e seu complemento, tendo em vista que esses elementos possuem dimensões físicas de subcomprimento de onda.

Albooyeh, Simovski e Tretyakov (2016) apontam que a distribuição dos elementos é fundamental para se determinar a resposta da estrutura. Essa propriedade diferencia as metassuperfícies das tradicionais FSS, que têm sua periodicidade na ordem do comprimento de onda operacional, geralmente sendo de $\lambda/2$.

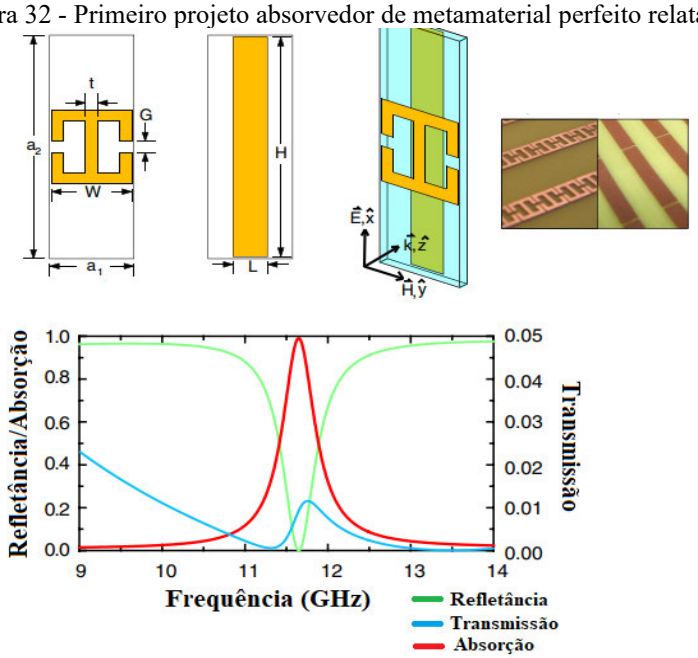
Segundo Aobo, Singh e Sievenpiper (2018), o controle do tamanho da célula unitária de uma metassuperfície permite a obtenção de diferentes índices de refração de superfície efetivos, possibilitando a padronização da estrutura para desempenhar múltiplas funções. Essas estruturas podem ser usadas para desenvolver lentes ópticas/micro-ondas, sistemas de antenas, absorvedores perfeitos, entre outros. Os absorvedores baseados em metassuperfícies oferecem vantagens sobre os absorvedores tradicionais, especialmente quando são combinados com dispositivos não lineares ou circuitos ativos.

Na literatura, é destacado que nos últimos anos, o interesse pelo desenvolvimento de absorvedores perfeitos de metamaterial tem chamado a atenção dos pesquisadores. De acordo com Watts, Liu e Padilla (2012), o absorvedor perfeito de metamaterial é aquele que pode atingir a absortividade unitária de ondas eletromagnéticas.

No ano de 2008, Landy *et al.* propuseram pela primeira vez um absorvedor perfeito usando uma metassuperfície. O projeto consiste em dois ressonadores de metamateriais (MMs) acoplados separadamente aos campos elétrico e magnético, com o objetivo de fornecer uma alta absorção dentro de um determinado ângulo e faixa de frequência. Cada camada de metalização foi fabricada em um substrato FR-4 com espessura de 0,2 mm; as placas foram coladas usando um adesivo com 0,06 mm de espessura.

Na Figura 32 pode ser visualiazo o projeto do absorvedor de metamaterial perfeito proposto por Landy *et al.* (2008).

Figura 32 - Primeiro projeto absorvedor de metamaterial perfeito relatado.



Fonte: Adaptado de Landy *et al*. (2008).

Landy *et al.* (2008) destacam que essa taxa de absorção quase unitária ocorre porque, quando ε e μ são manipulados independentemente, tanto o campo elétrico incidente quanto o campo magnético podem ser absorvidos. Os resultados da simulação alcançaram 100% de absorção, enquanto os resultados da medição mostram 96% de absorção.

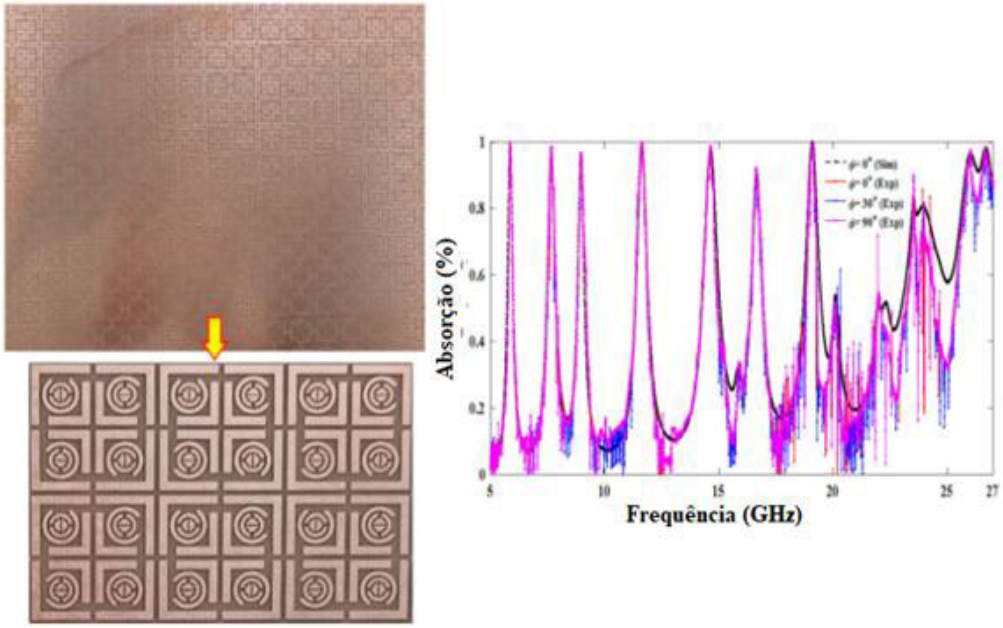
Com sistemas modernos de comunicação que exigem projetos mais compactos, é necessário desenvolver absorvedores de baixo perfil, e o uso de metassuperfícies para essa aplicação tem ganhado ainda mais notoriedade nos últimos tempos, como por exemplo, estruturas que aumentam a estabilidade angular, insensibilidade à polarização, melhoria na largura de banda de absorção e capacidade de absorver diversas faixas de frequências em ambientes específicos, podendo essas estruturas ser do tipo passivas ou reconfiguráveis (Cheng *et al.,* 2011; Zhu *et al.,* 2010a).

Geetharamani e Aathmanesan (2019) desenvolveram uma metassuperfície passiva baseada em SRR para absorção de sinais de Wi-Fi. A metassuperfície oferece dois picos de absorção com insensibilidade à polarização de 90° e estabilidade angular de 40°.

Já Yousaf *et al.* (2022a) apresentaram um absorvedor de metassuperfície de banda deca altamente eficiente para diversas aplicações de micro-ondas com uma espessura de 0,96 mm fabricado em FR-4. O absorvedor projetado alcançou resposta em 10 frequências distintas (5,86; 7,66; 8,96; 11,6; 14,6; 16,6; 19; 23,5; 26 e 26,7 GHz) com picos de absorção de 99,29; 98; 97; 99,59; 98,59; 92,99; 99,99; 87,05; 98 e 99,29%, respectivamente. Além disso, a independência à polarização alcançou 90° e a estabilidade angular de 70°.

A Figura 33 ilustra a metassuperfície absorvedora de banda deca desenvolvida por Yousaf *et al.* (2022a).

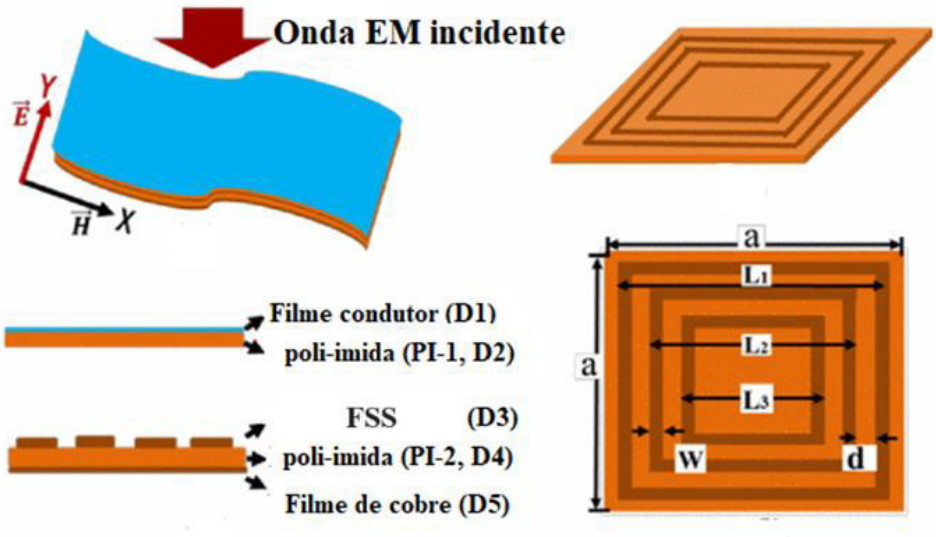
Figura 33 - Metassuperfície desenvolvida por Yousaf et al. (2022a).



Fonte: Adaptado de Yousaf *et al*. (2022a).

Liu, Sun e Wang (2020) propuseram um absorvedor multifrequência, ultrafino e flexível, baseado em uma metassuperfície passiva operando na faixa de micro-ondas. A estrutura do dispositivo é composta por duas partes principais. Na região superior, encontra-se uma camada condutora formada por filmes metálicos — como óxido de índio-estanho (ITO) ou outros materiais condutores com espessura D1, depositados sobre um substrato flexível de poli-imida (PI-1), com espessura D2. A resistência quadrada do filme condutor superior, também chamada de resistência superficial (*Rs*). A região inferior consiste em uma estrutura do tipo metal-dielétrico-metal (AR-MDM), projetada para produzir reflexão unitária (isto é, 100% de reflexão). Essa parte inferior é composta por um segundo filme de poli-imida (PI-2) com espessura D4, sobre o qual está padronizada uma matriz periódica de cobre com espessura D3. Na face oposta do PI-2, há uma camada contínua de cobre com espessura D5, formando a base refletora da estrutura. Essa configuração possibilita a absorção eficiente em múltiplas frequências, com uma espessura total da estrutura em torno de 0,2 mm, cobrindo a faixa de 6 GHz a 10 GHz. A Figura 34 ilustra o absorvedor proposto por Liu, Sun e Wang (2020).

Figura 34 - Metassuperfície absorvedoras ultrafina e flexível projetada por Liu, Sun e Wang (2020).



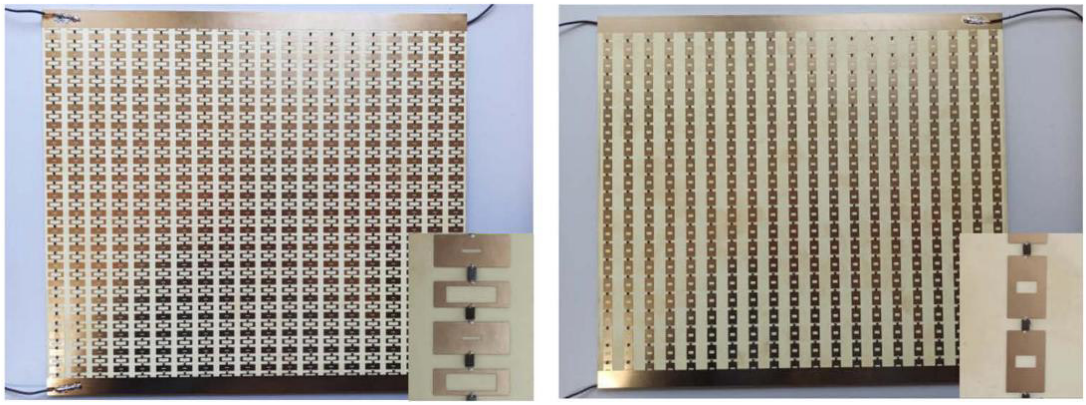
Fonte: Adaptado de Liu, Sun e Wang (2020).

No intuito de superar as limitações das metassuperfícies passivas, a eletrônica ativa, ou seja, a implementação de dispositivos eletrônicos como diodos PIN, varactores e transistores, desempenha um papel importante para as metassuperfícies ativas, pois possibilitam a realização de projetos que tenham uma absorção comutável e frequência de ressonância ajustável (Aobo; Singh; Sievenpiper, 2018).

Song *et al.* (2021) apresentaram uma metassuperfície reconfigurável, utilizando diodos PIN incorporados aos arranjos de células unitárias dispostas em uma estrutura multicamadas. A estrutura foi fabricada com um substrato da Rogers RO4350B com espessura de 1,524 mm. A metassuperfície destacou-se pela sua capacidade de alta absorção, reflexão e transmissão, alcançada através da integração estratégica dos diodos PIN tanto na camada superior quanto na inferior.

Essa funcionalidade é viabilizada pela manipulação das tensões de polarização dos diodos PIN inseridos na estrutura. Na Figura 35 pode ser vista a metassuperfície reconfigurável com diodos PIN desenvolvida por Song *et al.* (2021).

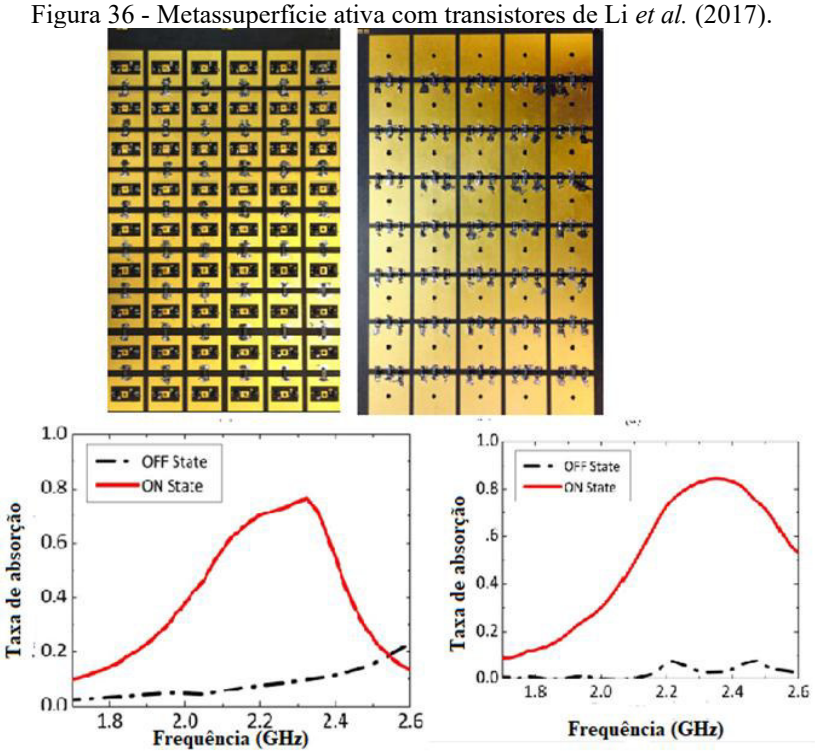
Figura 35 - Metassuperfície reconfigurável reflexão/absorção de Song et al. (2021).



Fonte : Adaptado de Song *et al.* (2021).

Li *et al.* (2017) propuseram uma metassuperfície absorvedora ativa usando transistores como elemento básico da estrutura. A aplicação de transistores cria uma metassuperfície não linear ativa, que pode permitir que a absorção da superfície seja controlada diretamente pelo sistema ou ajustada em resposta ao nível de potência local usando o controle de realimentação. Isso pode fornecer uma resposta de absorção nítida com uma ampla faixa de limite de potência controlável. Diferentes taxas de absorção no mesmo nível de potência também podem ser alcançadas aplicando diferentes polarizações aos transistores. Na Figura 36 pode ser vista a metassuperfície ativa com transistores proposta por Li *et al.* (2017).

Figura 36 - Metassuperfície ativa com transistores de Li *et al.* (2017).



Fonte: Adaptado de Li *et al*. (2017).

Comparado com o absorvedor baseado em diodo, o uso de transistores de efeito de campo (FET) oferece um grau adicional de liberdade, porque a absorção é controlada pela tensão da porta, em vez da tensão de ativação do diodo, tornando esta superfície comutável e ajustável em níveis de potência de micro-ondas baixo e alto, ou seja, a superfície de absorção baseada em transistor pode ser ligada (ON) ou desligada (OFF) em alta potência para fins de proteção e em baixa potência para fins de dispersão ou comunicação (Li *et al.,* 2017).

Além disso, a taxa de absorção pode ser facilmente ajustada por meio do ajuste da tensão de polarização dos transistores. Comparando com a adoção de diodos para fins de comutação, os FET podem ser mantidos em um estado de ajuste específico sem consumo de energia estática, pois são controlados por tensão. Por outro lado, o canal dreno-fonte do FET é simétrico, o que permite que os sinais conduzam nos dois sentidos. Os absorvedores ativos propostos pelos autores podem ser sintonizados sem prejudicar sua linearidade (Li *et al.,* 2017).

2.7 Geometria Bioinspirada e Superfórmula de Gielis

Desde a introdução do conceito de metamaterial, diversas geometrias foram propostas para células unitárias dessas estruturas, incluindo os SRRs básicos (Smith; Padilla, 2000), ressonadores espirais (Baena *et al.,* 2004), e as geometrias fractais (Palandoken; Henke, 2010). No entanto, à medida que a teoria dos metamateriais avança para conceitos mais complexos, é necessário desenvolver *designs* mais criativos para servir como blocos de construção dessas estruturas artificiais.

Um dos métodos mais interessantes para gerar uma variedade de formas para novas geometrias é a fórmula proposta por Johan Gielis (Gielis, 2003). Seguindo o trabalho do matemático dinamarquês P. Hein, Gielis introduziu sua superfórmula para descrever as curvas e geometrias complexas encontradas na natureza.

Esta fórmula tem sido utilizada para desenvolver novos projetos de antenas, como descrito por Souto *et al.* (2019), Bernardes *et al*. (2021) e Oliveira *et al.* (2022) e também em projeto de novas geometrias para FSS como apresentado por Mesquita *et al.* (2019) e Pereira *et al.* (2023), por exemplo. Ao usar a superfórmula de Gielis para células unitárias de metamateriais, pode-se explorar uma variedade de geometrias com grande potencial, como comportamento multibanda, dupla polarização e miniaturização (Zarghooni *et al.,* 2015).

Gielis (2003) propôs um modelo matemático capaz de descrever uma ampla gama de formas abstratas e naturais, inspiradas em elementos da natureza como folhas e flores. A superfórmula de Gielis é uma generalização das superelipses:

$$\left|\frac{x}{a}\right|^{n} + \left|\frac{y}{b}\right|^{n} = 1 \tag{21}$$

A utilização da coordenada polar $r = f(\phi)$ foi proposta, onde $x = r\,cos(\phi)$ e $y = r\,sen(\phi)$, com a introdução do $m/4$. Isso permitiu a simetria rotacional em certas estruturas e a flexibilidade de utilizar diferentes valores para o expoente n em cada termo $(n_1, n_{2,}\, n_3)$ (Serres *et al.,* 2017). Dese modo, uma expressão polar foi proposta para a superfórmula de Gielis, conforme a equação 22:

$$r(\phi) = \frac{1}{\left\{\left[\left(\left|\frac{1}{a}cos\left(\phi\frac{m}{4}\right)\right|\right)^{n_2} + \left(\left|\frac{1}{b}sen\left(\phi\frac{m}{4}\right)\right|\right)^{n_3}\right]^{\frac{1}{n_1}}\right\}} \tag{22}$$

Ao variar os parâmetros $a, b, m, n_1, n_{2,}\, n_3$ da superfórmula (22), é possível criar e modificar diversas formas. Além disso, quando combinada com outras funções matemáticas, a superfórmula pode gerar ainda mais variações. Exemplos de formas obtidas incluem folhas, flores, borboletas, estrelas, entre outras (Serres *et al.,* 2017).

2.8 Considerações Parciais

No Capítulo 2, foram descritos os aspectos fundamentais dos projetos de FSS, incluindo a análise da geometria do elemento básico, sua espessura e a reconfiguração da FSS. Esses parâmetros têm uma influência direta nas respostas das FSS. Além disso, foram verificados os fatores relacionados aos absorvedores de micro-ondas, abrangendo tanto os absorvedores convencionais quanto os absorvedores FSS e as metassuperfícies absorvedoras. Também foram abordados os conceitos básicos relacionados às geometrias bioinspiradas e a superfórmula de Gielis.

CAPÍTULO 3

3 ESTADO DA ARTE

No capítulo anterior, foi destacado o uso de absorvedores de micro-ondas utilizando FSS e metassuperfícies na área de telecomunicações. Essas tecnologias têm se destacado devido ao seu alto desempenho e à diversidade de aplicações em diferentes faixas de frequência. Esse tema tem ganhado relevância nos laboratórios de pesquisa, indústrias e universidades, resultando em diversas publicações científicas.

A pesquisa bibliográfica descrita nesse capítulo engloba uma seleção de artigos publicados no campo de estudo, abrangendo o período de 2018 a 2024. O principal objetivo dessa pesquisa é contribuir para o avanço do conhecimento e fornecer uma análise atualizada sobre o estado da tecnologia. Ao reunir essa variedade de artigos, busca-se agregar valor ao panorama atual do campo, oferecendo uma visão abrangente e atualizada dos avanços e descobertas mais recentes.

Nesse contexto, este capítulo apresenta os resultados de um levantamento bibliográfico voltado ao estudo de absorvedores eletromagnéticos baseados em estruturas de meio efetivo. Essas estruturas podem ser classificadas, principalmente, em dois grupos: *Single-Layer Effective Medium* (SLEM – Meio Efetivo de Camada Única) e *Three-Layer Effective Medium* (Meio Efetivo de Três Camadas).

As SLEM possuem uma única camada na qual as propriedades efetivas (ε_{eff} e μ_{eff}) podem ser controladas por meio da otimização da geometria e das propriedades do material empregado na fabricação, resultando em um casamento entre a impedância do espaço livre e a impedância de entrada da estrutura. Essa capacidade de ajuste permite atender aos requisitos de absorção em uma única faixa de frequência ou em múltiplas faixas de frequência (Landy *et al.,* 2008; Tao *et al.,* 2010; Watts; Liu; Padilla, 2012; Jiang *et al.,* 2016; Luo; Cheng, 2018; Coelho *et al.,* 2023), levando assim à obtenção de uma absorção máxima.

Já as estruturas de meio efetivo de três camadas consistem em três camadas distintas, cada uma com propriedades materiais específicas, como por exemplo, espessura, permissividade elétrica (ε) e permeabilidade magnética (μ). Nesse modelo multicamadas, o objetivo é descrever o comportamento eletromagnético da estrutura como um todo, em vez de analisar cada camada individualmente. Desse modo, a combinação das propriedades das três camadas para criar um conjunto de características em que as propriedades efetivas (ε_{eff} e μ_{eff}) podem ser otimizadas por meio da geometria e dos materiais utilizados. Isso permite tratar a

estrutura como homogênea, garantindo um casamento entre a impedância do espaço livre e a impedância de entrada da estrutura, o que possibilita atender aos requisitos de absorção em múltiplas faixas de frequência (Bhattarai *et al*., 2017).

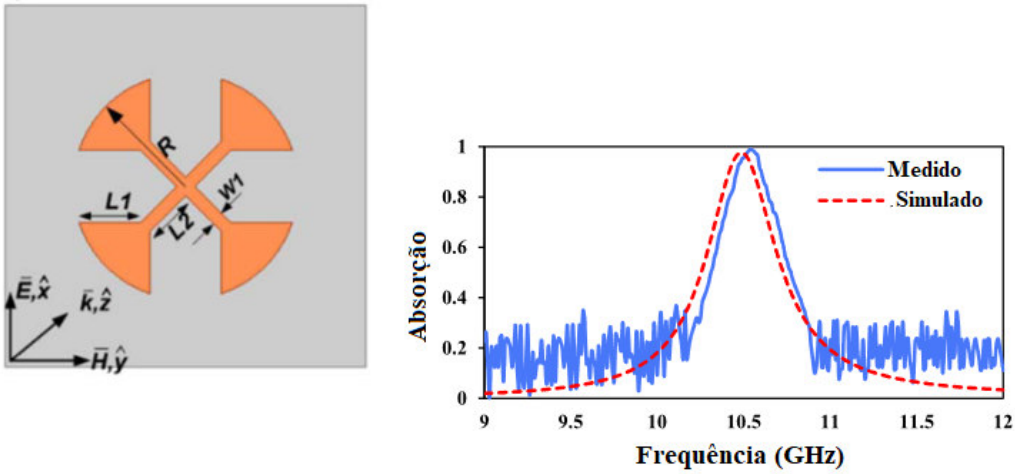
3.1 Levantamento Bibliográfico de 2018 a 2024

Zeng *et al.* (2018), projetaram um absorvedor baseado em metamaterial, compacto ultrafino, de banda tripla, com insensibilidade à polarização e estabilidade angular. A célula unitária do absorvedor consiste em uma cruz de Jerusalém e um anel circular concêntrico impresso em um substrato dielétrico de FR-4 de 1 mm de espessura apoiado por um plano de terra. Os resultados simulados mostram que o absorvedor proposto com três picos de absorção em 4,4 GHz, 6,05 GHz e 14,2 GHz com taxas de absorção de 95%, 97% e 97%, respectivamente. A estrutura possui uma célula unitária compacta com a dimensões de $0{,}2024\lambda_0 \times 0{,}2024\lambda_0$ e uma espessura geral de $0{,}0147\lambda_0$ (λ_0 comprimento de onda para menor frequência de absorção). Uma estrutura de 238 mm × 238 mm × 1mm (16 × 16 células unitárias) foi fabricada e caracterizada experimentalmente, apresentando boa concordância entre os resultados medidos, simulados e calculados.

Singh, Abegaonkar e Koul (2019) desenvolveram um absorvedor eletromagnético de banda tripla para aplicações nas bandas C e X. A estrutura proposta consiste em uma camada superior metálica formada por dois ressonadores de anel circular que foram modificados para tornar o absorvedor compacto, separados por um substrato dielétrico (GML 1000) de espessura de 0,50 mm de um plano de terra. O absorvedor apresentou insensibilidade à polarização com estabilidade angular de até 45° no azimute e 30° no plano de elevação. Os picos de absorção de 97,50%, 96,50% e 98,85% em 4,19 GHz, 6,64 GHz e 9,95 GHz, respectivamente, foram obtidos. As larguras de banda de absorção nessas frequências são 610 MHz, 670 MHz e 570 MHz, respectivamente, com mais de 90% de absorção. A estrutura possui uma célula unitária de $0{,}1956\lambda_0 \times 0{,}1956\lambda_0$ e uma espessura de $0{,}0069\lambda_0$. Os autores confirmaram a absorção de ondas eletromagnéticas, analisando o perfil de temperatura do absorvedor proposto. Para isso, foram feitas medições por meio de um equipamento de termografia infravermelha com técnica *lock-in*; um aumento de temperatura de 1,5 °C foi observado em todas as frequências de absorção com potência de RF transmitida de 10 dBm. Observou-se boa concordância entre a simulação e os resultados medidos. O projeto proposto pode ser usado para tecnologia *stealth* em aplicações de defesa, aplicações de radar e redução de EMI/EMC.

No artigo de Kalraiya *et al.* (2019) foi proposto um absorvedor de metassuperfície independente de polarização e estabilidade angular para aplicação na banda X. A camada superior é composta por uma célula unitária baseada em partes circulares interligadas por uma geometria em forma de cruz sob um dielétrico de FR-4 e um plano de terra. O absorvedor mostrou um bom casamento de impedância com espaço livre em 10,48 GHz junto com 97% de absortividade, conforme mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Metassuperfície absorvedora desenvolvida por Kalraiya *et al.* (2020).

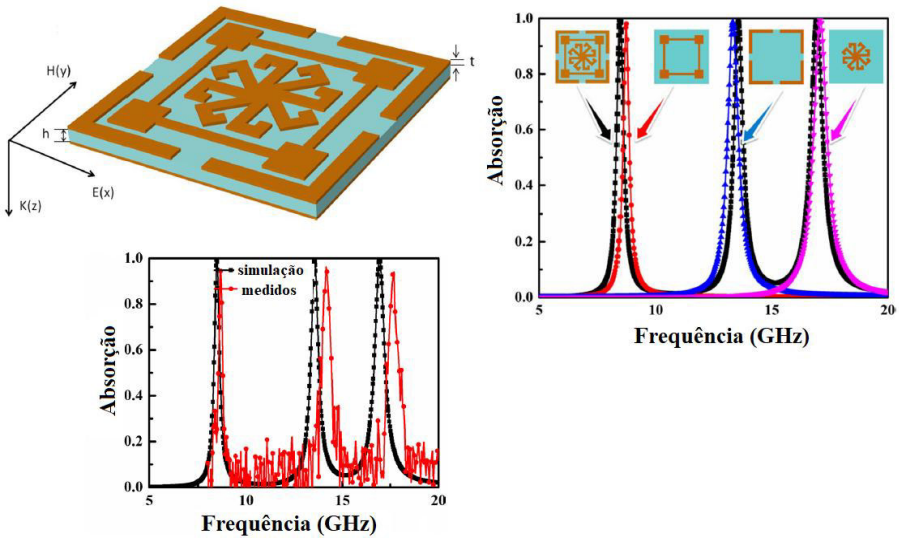


Fonte: Adaptado de Kalraiya *et al.* (2019).

Um protótipo da metassuperfície foi fabricado com tamanho total de 240 mm × 240 mm × 0,8 mm e apresentou uma *Full Width at Half Maximum* (FWHM - Largura a Meia Altura) de 480 MHz (10,24 GHz -10,72 GHz) e nos modos TE (Transversal Elétrico) e TM (Transversal Magnético) a absortividade foi mantida acima de 90% até ângulo de incidência de 60°. O absorvedor possui uma célula unitária com dimensões de $0{,}2794\lambda_0 \times 0{,}2794\lambda_0$ e uma espessura de $0{,}028\lambda_0$. O projeto pode ser aplicado em redução da seção reta de radar e tecnologia furtiva (Kalraiya *et al*., 2019).

A pesquisa de Deng *et al.* (2020) propôs uma metassuperfície absorvedora composta por uma camada superior metálica baseada na combinação de um ressonador de anel fendido, um ressonador de anel modificado e oito estruturas idênticas em forma de "7", cada uma rotacionada a 45° ao longo do centro da unidade, uma camada dielétrica de um substrato de poli-imida e um plano de terra metálico. O absorvedor apresentou características de baixo perfil e flexibilidade, alcançando banda tripla em 8,5 GHz, 13,5 GHz e 17 GHz (bandas X e Ku) com uma taxa de absorção de 99,9%, 99,5% e 99,9%, respectivamente. O absoverdor tem célula unitária de tamanho $0{,}2266\lambda_0 \times 0{,}2266\lambda_0$ e uma espessura de 0,4 mm, que é aproximadamente $0{,}0113\lambda_0$ e como pode ser visto na Figura 38.

Figura 38 - Metassuperfície absorvedora desenvolvida por Deng *et al.* (2020).



Fonte: Adaptado de Deng *et al.* (2020).

O projeto de Deng *et al.*, (2020) também apresentou insensibilidade à polarização devido à sua geometria simétrica. Além disso, alcançou absorção máxima de 86% (incidência TE) dentro de um ângulo de incidência de 60°. Para incidência TM, o absorvedor proposto exibiu mais de 99% de absortividade até 60° de ângulo de incidência. O desempenho da metassuperfície (20 × 30 células unitárias) projetada foi demonstrado experimentalmente. O desempenho no espaço livre e os resultados experimentais e simulados apresentaram uma boa concordância. O absorvedor proposto, segundo os autores, pode ser usado na captação de energia e blindagem eletromagnética.

No artigo de Moniruzzaman *et al.* (2020) foi apresentada uma metassuperfície absorvedora na faixa de micro-ondas baseada em uma geometria de um ressonador de anel fendido assimétrico circular modificado. O absorvedor projetado exibiu quatro picos de absorção cobrindo as bandas C, X e Ku. A célula unitária da estrutura foi impressa em um substrato FR-4 com dimensões de $0{,}1093\lambda_0 \times 0{,}1093\lambda_0$ e um plano de terra. O ressonador da célula unitária passou por processo de parametrização para otimização e alcançou picos máximos de absorção de 97,9%, 99,1%, 99,5% e 99,95% em 4,1 GHz, 6,86 GHz, 11,3 GHz e 13,45 GHz, respectivamente. Um protótipo de 128 mm × 128 mm × 1,5 mm foi fabricado e caracterizado experimentalmente. Os resultados obtidos nas medições em laboratório apresentaram boa correspondência com os resultados simulados. A estrutura apresentada por Moniruzzaman *et al.* (2020), apresentou-se como uma alternativa para aplicações em multibanda, como por exemplo, detecção, filtragem para diminuição de reflexões causadas pela parte metálica dos radares e antenas de satélite.

O estudo de Hannan *et al.* (2020) apresentou uma metassuperfície absorvedora simétrica que foi baseada em anel dividido e segmentado modificado para as bandas X, Ku e K impressa em substrato de FR-4 e um plano de terra. A estrutura alcançou uma largura de banda de absorção total de -10 dB em 1,91 GHz. Foi realizada uma análise paramétrica para otimização do absorvedor e, posteriormente, foi feita a validação do estudo, onde fabricou-se um protótipo com dimensões de 9 mm × 9 mm × 1,58 mm, em que as dimensões elétricas para a espessura e a célula unitária corresponderam a $0{,}0599\lambda_0 \times 0{,}0599\lambda_0$ e $0{,}0599\lambda_0$, respectivamente que foram testadas em um guia de onda.

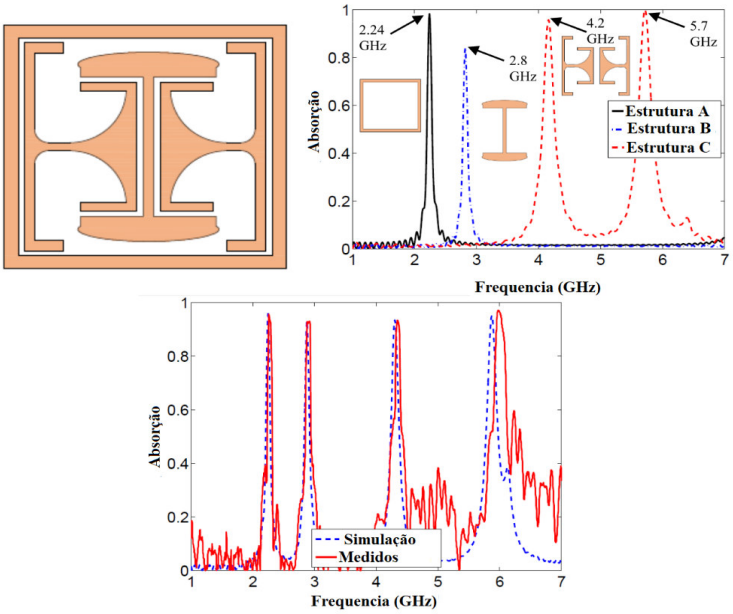
Para as análises em incidência normal e oblíqua, foi fabricada uma estrutura composta por um arranjo de 18 × 18 células unitárias, sendo avaliados os modos TE e TM para ângulos de até 90°. A estrutura apresentou taxas de absorção de 85,51%, 99,13%, 98,19% e 90,8% nas frequências de 11,23 GHz, 14,18 GHz, 17,37 GHz e 19,18 GHz, respectivamente. O projeto apresentou potenciais aplicações em EMI/EMC, identificação de espectro, redução de ruído de antena em frequências mais altas, detecção de sinal, imagens de radar, comunicações por satélite, entre outros (Hannan *et al.*, 2020).

Edries *et al.* (2020), projetaram e analisaram um absorvedor de metamaterial de banda quádrupla. A estrutura proposta foi construída como uma matriz de 12 × 13 células unitárias, baseada em uma combinação de ressonadores combinando geometrias em um formato de "I" e quadrado impressa em substrato de FR-4 apoiado em um plano de terra. Um protótipo foi fabricado com dimensões de 20 mm × 20 mm × 1,5 mm.

A estrutura exibiu quatro picos de absorção distintos em 2,248 GHz, 2,878 GHz, 4,3 GHz e 5,872 GHz (bandas S e C) com taxas de absorção de 96%, 93%, 93% e 95%, respectivamente, sob incidência normal e uma largura de banda de 78 MHz, 144 MHz e 202,6 MHz. As dimensões da célula unitária da estrutura proposta foram de $0{,}1498\lambda_0 \times 0{,}1498\lambda_0$ com espessura de $0{,}0112\lambda_0$. O projeto pode ser usado em proteções eletromagnéticas, bem como, em aplicações militares e médicas (Edries *et al.*, 2020).

Na Figura 39 pode ser visto o projeto do absorvedor desenvolvido por Edries *et al.* (2020).

Figura 39 - Metassuperfície absorvedora proposta por Edries *et al.* (2020).



Fonte: Adaptado de Edries *et al.* (2020).

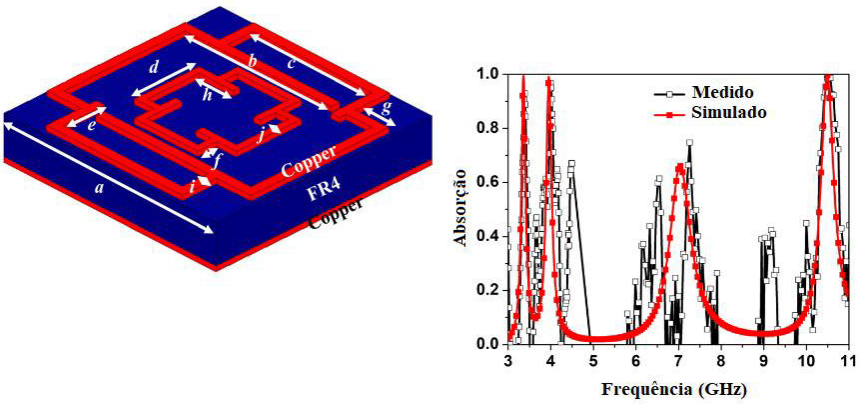
Zhang *et al.* (2021) projetaram um absorvedor de banda tripla que é composto de uma estrutura metal-dielétrico-metal baseada em uma geometria de espira quadrada modificada combinada com uma forma inspirada em asterisco. O projeto passou por um processo de parametrização e otimização, alcançando três picos de absorção nas bandas S, C e X. Um protótipo foi fabricado em um substrato de FR-4 de 1 mm e as medições mostraram que os três picos com uma absorção superior a 99% em 3,72 GHz, 5,86 GHz e 10,54 GHz. Verificou-se também que o absorvedor proposto tem característica de independência de polarização, que é produzida a partir das propriedades de simetria da estrutura, e também possui uma estabilidade do ângulo de incidência nos modos TE e TM até 40º. O perfil da estrutura foi de $0{,}012\lambda_0$, podendo ser utilizado nas áreas de RCS, blindagem eletromagnética, sensoriamento dentre outras aplicações.

Puri e Singh (2021) projetaram um absorvedor de camada única com camadas de metal-dielétrico-metal baseado em uma geometria de anel quadrado com um *patch* simétrico dentro do anel mais interno de banda tripla operando nas bandas C, X e Ku, que atingiu uma absorção de aproximadamente 99%. Após a realização de um processo de otimização a dimensões da célula unitária foi de $0{,}1140\lambda_0 \times 0{,}1140\lambda_0$ e a espessura foi de $0{,}0126\lambda_0$. A estrutura alcançou uma absorção máxima de resultado de 99,96%, 99,98% e 99,62% em 4,75 GHz (banda C), 9,47 GHz (banda X) e 14,40 GHz (banda Ku), respectivamente, além disso, apresentou independência de polarização e estabilidade angular.

Luo *et al.* (2021) desenvolveram um absorvedor de banda dupla operando na banda C. A estrutura é composta por três camadas, em que a camada superior é formada por um ressonador no formato de um dipolo cruzado e um ressonador circular externo. As camadas superior e inferior são feitas de cobre e a camada intermediária é preenchida com o dielétrico FR-4. O absorvedor proposto possui dimensções elétrica $0{,}2072\lambda_0 \times 0{,}20720\lambda_0 \times 0{,}01480\lambda_0$. Um protótipo foi fabricado com 210 mm × 210 mm × 1 mm e os resultados mostraram duas bandas de absorção diferentes nas frequências de ressonâncias de 4,44 GHz e 7,85 GHz, cuja absorção é de aproximadamente 99,93% e 99,99%, respectivamente. Além disso, a estrutura é independente de polarização e estável angularmente, podendo ser aplicado em antena de radar de banda C, comunicação via satélite ou outros campos relativos.

Jain *et al.* (2021) propuseram uma metassuperfície absorvedora assimétrica baseada em dois ressonadores quadrados modificados impressos em um substrato dielétrico de FR-4 e um plano de terra metálico. A estrutura proposta exibiu uma absorção em 3,36 GHz, 3,95 GHz e 10,48 GHz com absorção de 99,42%, 99,10% e 99,90%, respectivamente. O absorvedor possui dimensões de $0{,}2072\lambda_0 \times 0{,}20720\lambda_0 \times 0{,}01480\lambda_0$. Além disso, o absorvedor foi analisado com diferentes polarizações e ângulos de incidência no modo TE, podendo ser aplicado nas bandas S e X. A Figura 40 ilustra a metassuperficie absorvedora proposta por Jain *et al.* (2021).

Figura 40 - Metassuperfície absorvedora proposta por Jain et al. (2021).



Fonte: Adaptado de Jain *et al.* (2021).

Hannan *et al*. (2021) investigaram um absorvedor de camada única composto por uma camada superior de metal, uma camada dielétrica de FR-4 e um plano de terra que alcançou quatro picos de absorção nas bandas C, X e Ku. Após, um processo de parametrização e otimização foi fabricado um protótipo do absorvedor de tamanho 180 mm × 180 mm × 1,6 mm (15 × 15, em que cada célula unitária possui dimensões de aproximadamente

0,1695 $\lambda_0 \times$ 0,1695$\lambda_0 \times$ 0,2054λ_0). Os resultados das simulações e medições apresentaram boa concordância alcançando cinco picos de absorção de 99,76%, 94,97%, 98,55%, 98,54% e 99,15% em 4,238 GHz, 7,836 GHz, 10,482 GHz, 11,014 GHz e 13,352 GHz, respectivamente. O projeto provou ser interessante para aplicações de melhoria de ganho e a diretividade de antenas e outras aplicações nas bandas C, X e Ku.

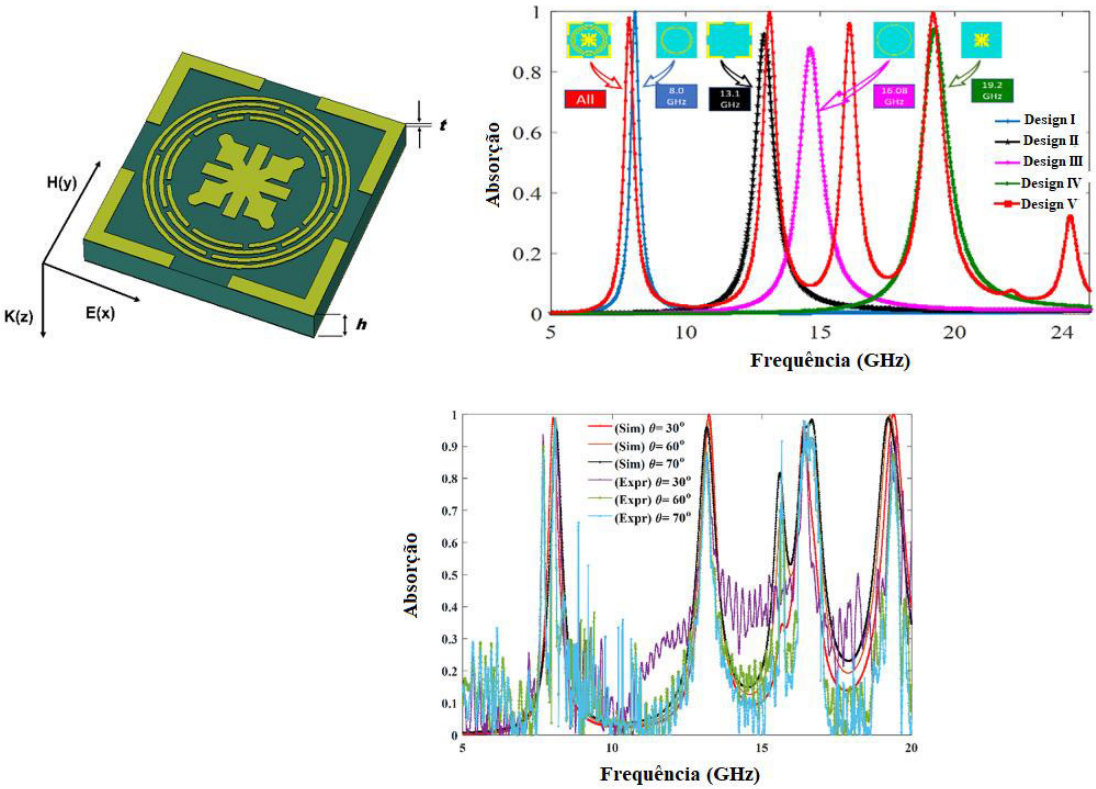
Afsar *et al*. (2022), relatam uma metassuperfície absorvedora de camada única baseada na combinação de um ressonador de anel octogonal fechado com duas tiras de metal de diapasões com um ressonador central em forma de haltere impressas em substrato dielétrico FR-4 e um plano de terra. O absorvedor foi avaliado numericamente e experimentalmente e alcançou banda dupla em 6,45 GHz e 14,89 GHz com absorção de 99,15% e 99,76%, respectivamente, para incidência TE. A estrutura demonstrou insensibilidade à polarização para ângulos de até 30° e estabilidade angular para incidências oblíquas de até 60°. A célula unitária possui dimensões elétricas de 0,1720$\lambda \times$ 0,1720$\lambda_0 \times$ 0,0344λ_0. O absorvedor baseado em metamaterial apresentado é adequado para aplicações nas bandas de comunicação via satélite, tecnologia *stealth* e aplicações de defesa e segurança.

O trabalho de Yousaf *et al.* (2022b) propõe metassuperfície absorvedora multibanda, de baixo perfil e de camada única. A célula unitária da estrutura proposta é baseada em ressonadores de anel dividido (SRRs) que consistem em um anel externo em forma de quadrado, quatro anéis circulares e uma geometria interna em forma de estrela simétrica, gravada em um substrato FR-4 apoiado por um plano de terra.

O projeto atingiu picos de 8,0 GHz, 13,1 GHz, 16,08 GHz e 19,2 GHz com 99,69%, 99,99%, 97,59% e 99,99% de máxima absorção, respectivamente. O projeto da célula unitária do absorvedor possui dimensões de 0,2133$\lambda_0 \times$ 0.2133$\lambda_0 \times$ 0.0173λ_0. Além disso, o projeto tem insensibilidade de polarização (φ) de até 90° e uma estabilidade angular (θ) de até 70°, podendo ser usados em aplicações das bandas X, Ku e K (Yousaf *et al.*, 2022b).

Na Figura 41 é ilustrado a metassuperficie absorvedora proposta por Yousaf *et al.* (2022b).

Figura 41 - Metassuperfície absorvedora proposta por Yousaf *et al.* (2022b).



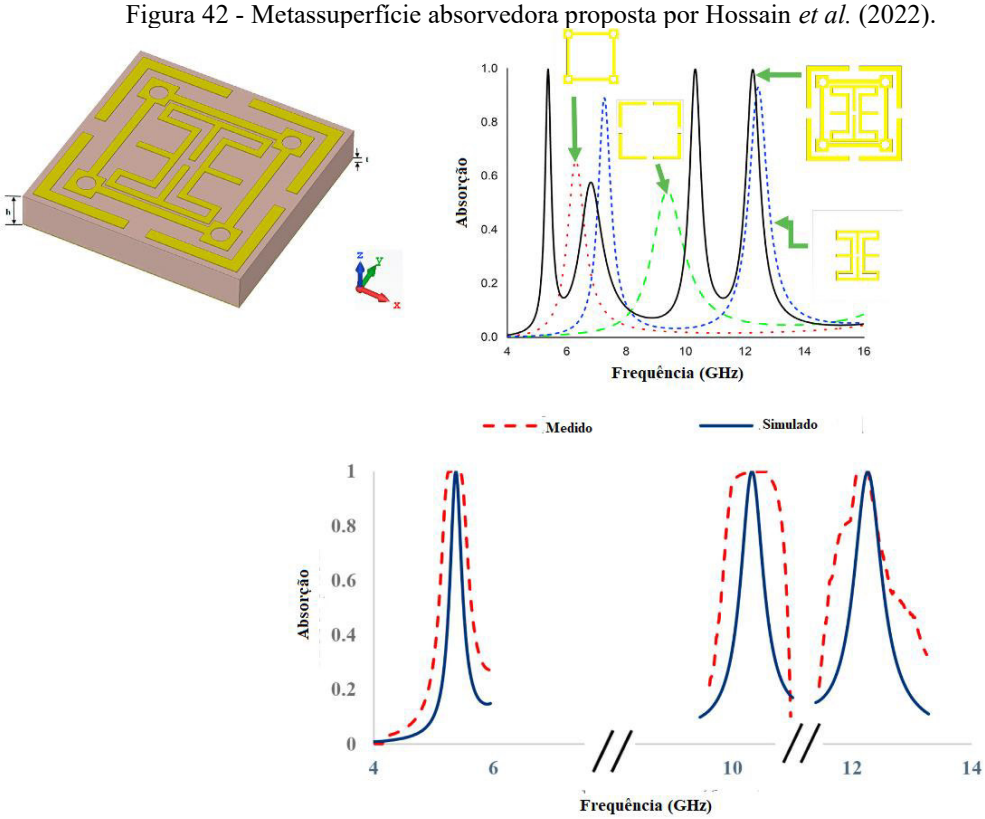
Fonte: Adaptado de Yousaf *et al*. (2022b).

Hossain *et al*. (2022) propuseram uma metassuperfície absorvedora de banda tripla composta de uma camada superior baseada em um ressonador de formato duplo em forma de "E" com dois ressonadores de cobre à base de ressonadores de anel dividido modificados separados por uma camada dielétrica FR-4 com espessura de 1,6 mm e um plano de terra.

O absorvedor proposto possui uma dimensão de $0{,}1792\lambda_0 \times 0{,}1792\lambda_0 \times 0{,}0286\lambda_0$. Os resultados simulados e experimentais tiveram boa concordância, exibindo três picos de absorção em 5,376 GHz, 10,32 GHz e 12,25 GHz com uma absorção de 99,9%, 99,9% e 99,7%, respectivamente. Além disso, a estrutura mostrou absorções em um amplo ângulo de incidência de até 60° para os modos TE e TM. A estrutura proposta possui um comportamento de blindagem de banda tripla e fornece a eficácia da blindagem superior a 40 dB para toda a banda, tanto para condição simulada quanto medida, o que é uma redução razoável no sinal de RF para reduzir o impacto em dispositivos suscetíveis a interferência eletromagnética, podendo ser aplicadas em blindagem EMI nas bandas C, X e Ku (Hossain *et al*., 2022).

Na Figura 42 pode ser visualizado o projeto desenvolvido por Hossain *et al*. (2022).

Figura 42 - Metassuperfície absorvedora proposta por Hossain *et al.* (2022).

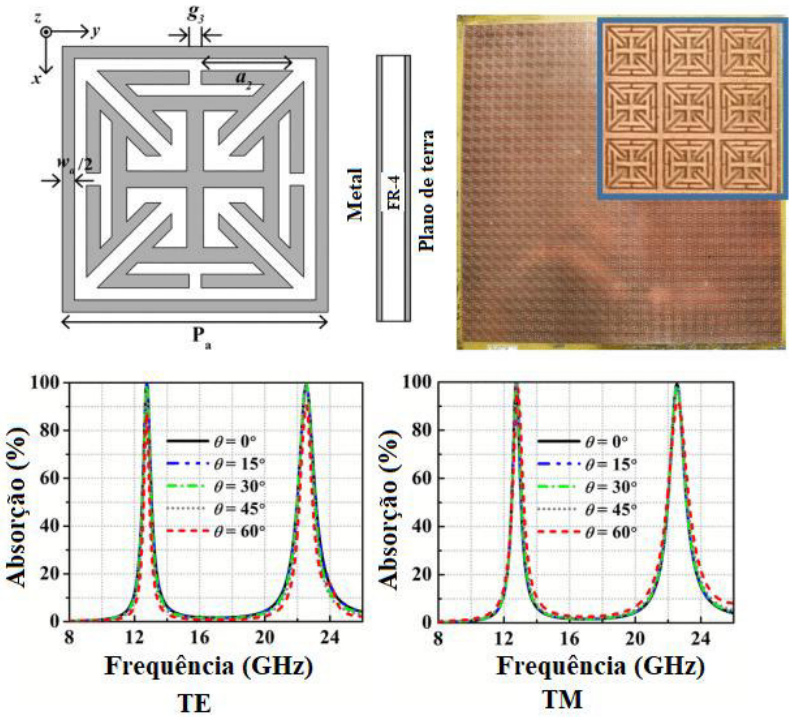


Fonte: Adaptado de Hossain *et al*. (2022).

A pesquisa de Hakim *et al*. (2022) propõe um ressonador de anel dividido quadrado modificado, onde a estrutura de metamaterial é impressa na camada superior de substrato FR- 4 apoiado por um plano de terra. A estrutura alcançou picos de absorção nas bandas de frequência de 14,62 GHz e 16,30 GHz, onde o pico de absorção é de cerca de 99,99% para ambas as bandas de frequência e 70% da largura de banda de absorção média de 420 MHz (14,42 GHz - 14,84 GHz) e 480 MHz (16,06 GHz - 16,54 GHz). O tamanho da célula unitária foi de aproximademente de 0,4385 $\lambda_0 \times 0{,}43852\lambda_0 \times 0{,}0779\lambda_0$. O absorvedor proposto pode ser um bom candidato para aplicação de absorção na banda Ku.

O estudo de Dey e Dey (2022) propôs um absorvedor metamaterial com resposta multibanda. O projeto é constituído por duas camadas metálicas separadas por um substrato dielétrico FR-4 de 0,5 mm de espessura. A camada metálica superior apresenta uma geometria baseada em uma cruz de Jerusalém modificada, enquanto a camada metálica inferior é um plano de terra completo (Figura 43) com uma célula unitária de dimensões de $0{,}1488\lambda_0 \times 0{,}1488\lambda_0 \times 0{,}0226\lambda_0$. O absorvedor alcançou resposta multibanda em 12,76 GHz e 22,54 GHz, com absorções de 99,88% e 99,1%, respectivamente. Além disso, o projeto demonstrou estabilidade angular para ângulos de incidência oblíqua de até 60°, destacando-se por não apresentar lóbulos de grade próximos aos picos de absorção em ângulos oblíquos elevados.

Figura 43 - Metassuperfície absorvedora proposta por Dey e Dey (2022).

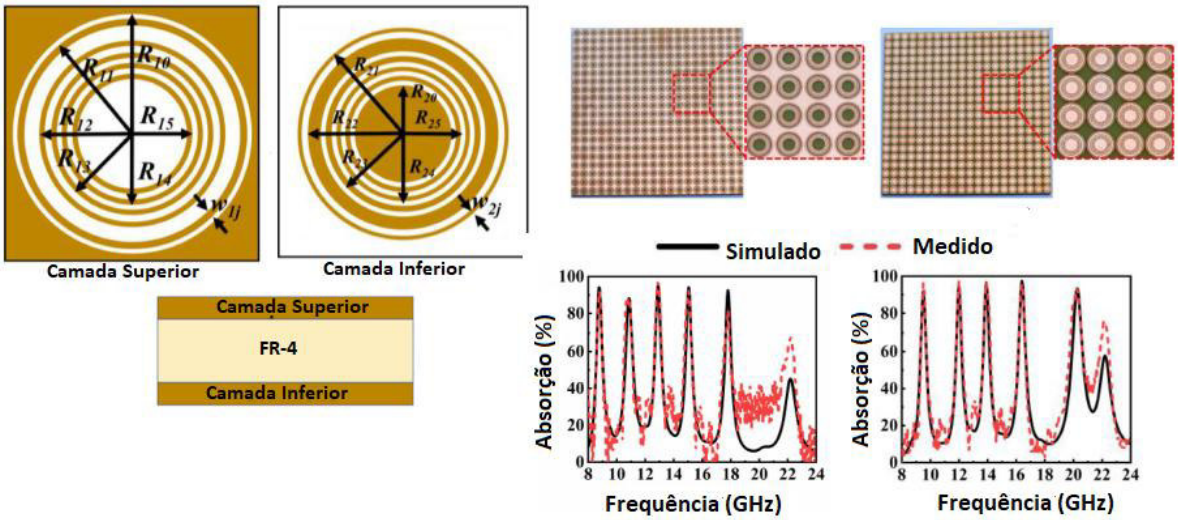


Fonte: Adaptado de Dey e Dey (2022).

Shukoor e Dey (2022) desenvolveram um absorvedor com onze picos de absorção entre a faxai de 8 a 22 GHz. A geometria da estrurura foi baseada em ressoadores de anéis circulares simples projetado para operar nas bandas X, Ku e K. O projeto consiste principalmente em duas FSSs, sendo uma complementar à outra, impressas em ambos os lados de um substrato dielétrico de FR-4 com 2,4 mm de espessura. A estrutura desenvolvida apresentou um comportamento eletromagnético que pode ser descrito por meio de parâmetros efetivos e alcançou uma absorção média de 94,6% para os onze picos de absorção obtidos. O projeto apresentou dimensões de $0.1920\lambda_0 \times 0.1920\lambda_0 \times 0.0640\lambda_0$. Um arranjo de 20 × 20 foi fabricado e medido e alcançou independência de polarização e estabilidade angular até 60º.

A Figura 44 ilustra o projeto do absorvedor proposto por Shukoor e Dey (2022).

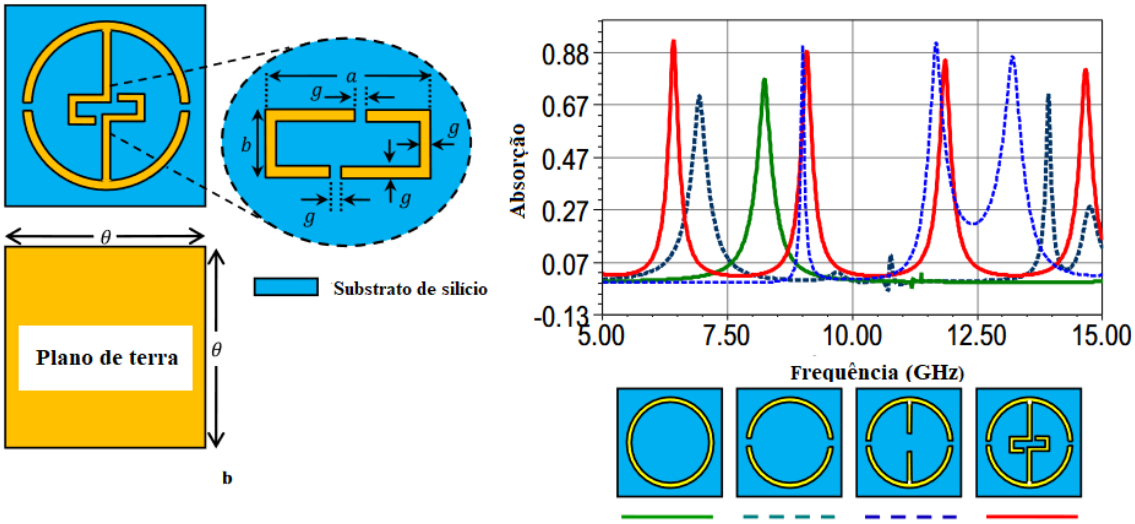
Figura 44 - Metassuperfície absorvedora proposta por Shukoor e Dey (2022).



Fonte: Adaptado de Shukoor e Dey (2022).

No trabalho de Bennaoum *et al.* (2023), foi desenvolvido um absorvedor de metamaterial de banda quádrupla para aplicações que cobrem as bandas de frequência utilizadas por dispositivos de micro-ondas multibanda. O absorvedor proposto apresenta propriedades eletromagnéticas eficazes, sendo um forte candidato para aplicações em sensores e sistemas de radar, além de apresentar potencial para uso em controle de tráfego aéreo, comunicação via satélite e proteção contra ondas eletromagnéticas emitidas por telefones celulares. Foi usado um substrato de silício de 1,53 mm, sendo que na camada superior foi gravada a geometria da célula básica no formato de um ressonador circular de formato duplo T e na camada inferior um plano de terra para evitar a transmissão. A célula básica tem as dimensões elétricas da ordem de $0{,}3858\lambda_0 \times 0{,}3858\lambda_0 \times 0.0327\lambda_0$. A estrutura projetada alcançou quatro picos em 6,43 GHz, 9,10 GHz, 11,86 GHz e 14,67 GHz com 89,40 %, 99,66%, 99,10% e 95,22% de absorção, respectivamente. As simulações mostram um comportamento de banda quádrupla, insensível à polarização para o absorvedor proposto por Bennaoum *et al.* (2023). Na Figura 45 é ilustrado o absorvedor proposto por Bennaoum *et al.* (2023).

Figura 45 - Metassuperfície absorvedora proposta por Bennaoum *et al.* (2023).



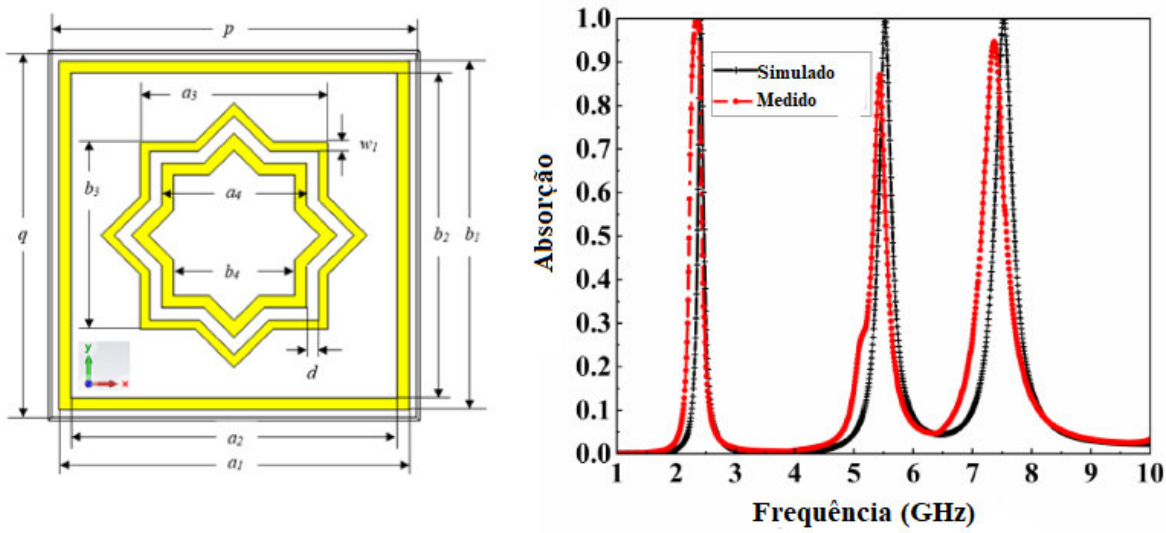
Fonte: Adaptado de Bennaoum *et al.* (2023).

Genikala, Ghosh e Roy (2023) investigaram um absorvedor de micro-ondas de banda tripla de camada única, independente da polarização, com alta estabilidade sob incidência oblíqua. O formato da célula unitária da estrutura absorvedora proposta contém três ressonadores, sendo um ressonador quadrado mais externo que foi projetado para ressonância de 2,4 GHz (WiMAX), e duas geometrias em forma de estrela hexadecagonal projetadas para 5,5 GHz (WLAN) e 7,51 GHz (frequências de comunicação por satélite de *downlink* na banda X) impressos na parte superior de um substrato de FR-4 de 1,6 mm apoiado por um plano de terra. O tamanho da célula unitária foi $0{,}1158\ \lambda_0 \times 0{,}1158\lambda_0 \times 0{,}0128\lambda_0$.

O absorvedor se mostrou independente de polarização para os modos de propagação TE e TM e também ofereceu estabilidade angular para incidência oblíqua para os modos TE e TM, alcançou uma absorção de 90% até o ângulo de 52° e absorção de 80% até 75°, podendo ser aplicado em EMI/EMC (Genikala; Ghosh; Roy, 2023).

Na Figura 46 pode ser visto o projeto da metassuperfície absorvedora proposta por Genikala, Ghosh e Roy (2023).

Figura 46 - Metassuperfície absorvedora proposta por Genikala, Ghosh e Roy (2023).



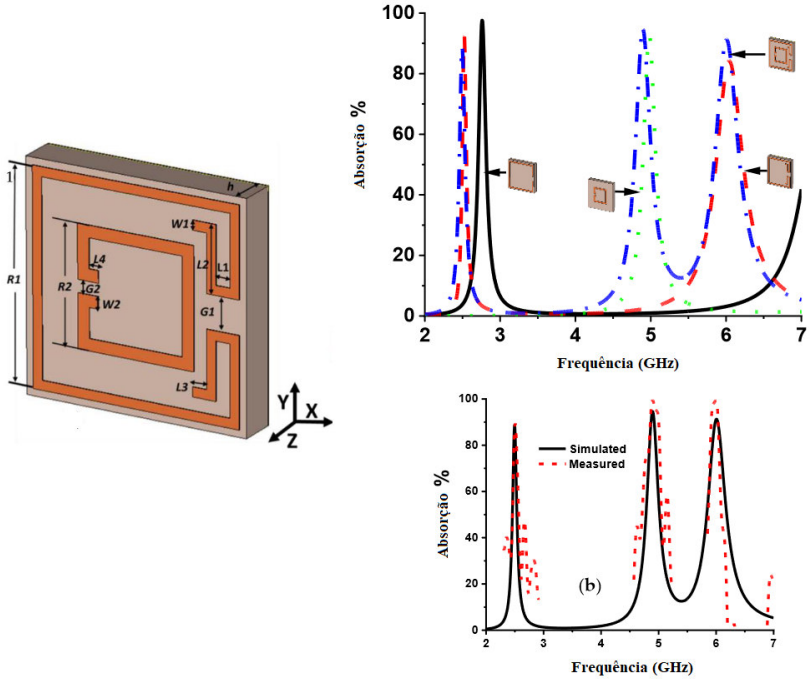
Fonte: Adaptado de Genikala, Ghosh e Roy (2023).

Jahan *et al.* (2023) desenvolveram um absorvedor de banda tripla, insensível a polarização e estável angularmente, combinando ressonadores metálicos baseado em quadrados com aberturas e um ressonador em forma de "H" e um plano de terra metálico separado por um substrato Rogers RO4003C de espessura 0,58 mm. A dimensão da célula unitária do absorvedor foi de $0{,}1664\lambda_0 \times 0{,}1664\lambda_0 \times 0{,}0121\lambda_0$. A absorção alcançou as bandas C, X e K e atingiu picos em 6,24 GHz, 10,608 GHz e 18,624 GHz com absorção de 97,8%, 99,9% e 99,9%, respectivamente, em condições normais e oblíquas de 0° a 45°. O absorvedor ultrafino se mostrou adequado para uma ampla gama de aplicações, incluindo aplicações de satélite, como sistemas de radar, tecnologia *stealth*, geração de imagens e redução de interferência eletromagnética.

Hakim *et al.* (2023), projetaram um absorvedor baseado em metamaterial de ressonador de anel dividido quadrado (SSRR) e dois braços com SSRR externos para aplicação sub-6 GHz. A célula unitária da estrutura foi projetada e fabricada na parte superior de em substrato FR-4 apoiado por um plano de terra. A dimensão da célula unitário foi de $0{,}0741\lambda_0 \times 0{,}0741\lambda_0 \times 0.013\lambda_0$ e exibiu bandas de frequência de 2,5 GHz, 4,9 GHz e 6 GHz com um pico de absorção de 90%, 99%, e 97%, respectivamente. A metassuperfície proposta pode ser usada para bandas de frequência específicas de aplicações 5G, como absorção de sinal, redução de SAR, etc. (Hakim *et al.*, 2023).

A Figura 47 ilustra a metassuperficie absorvedora desenvolvida por Hakim *et al.* (2023).

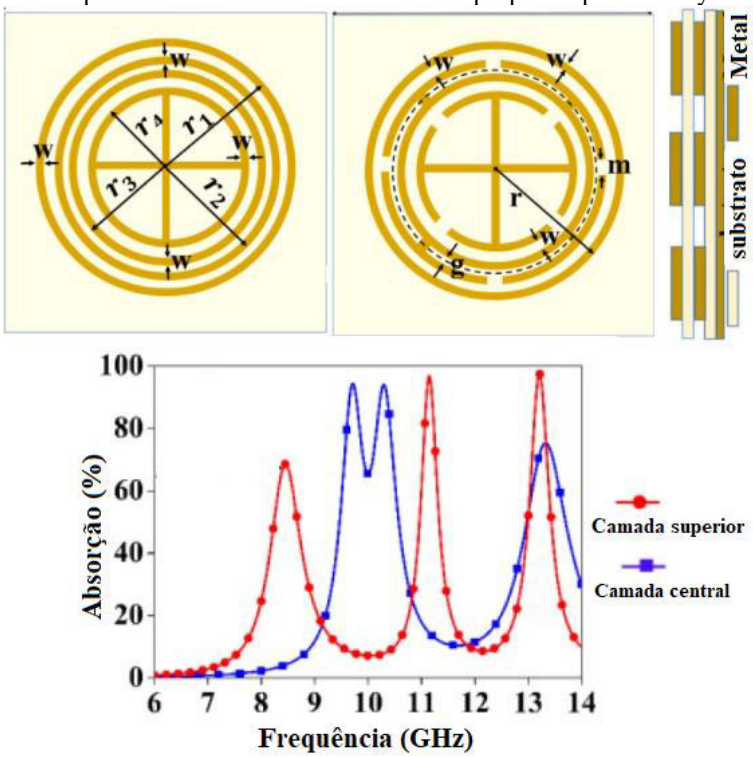
Figura 47 - Metassuperficie absorvedora desenvolvida por Hakim *et al.* (2023).



Fonte: Adaptado de Hakim *et al* (2023).

Routray e Ghosh (2024) apresentam um absorvedor multicamada que opera nas bandas C, X e Ku. A estrutura foi projetada empilhando duas camadas metamaterial de banda dupla, que a primeira camada consiste em uma geometria formada por quatro anéis concêntricos em configuração cruzada. Enquanto isso, a camada intermediária é formada por dois conjuntos de anéis embutidos e anéis divididos, todos centralizados em torno de uma haste cruzada, a estrutura apresenta plano de terra completo (Figura 48). O absorvedor proposto foi projetado para reduzir as interferências na banda de frequência de 13 GHz, ou seja, 12,75 a 13,25 GHz, que é usada para canais de RF para operação de sistema fixo sem fio e para a banda de frequência de serviços de transmissão direta por satélite, ou seja, 10,7 GHz - 12,75 GHz. O projeto apresentou absorção maior que 90% em todas as frequências de absorção e uma estabilidade angular até 60º.

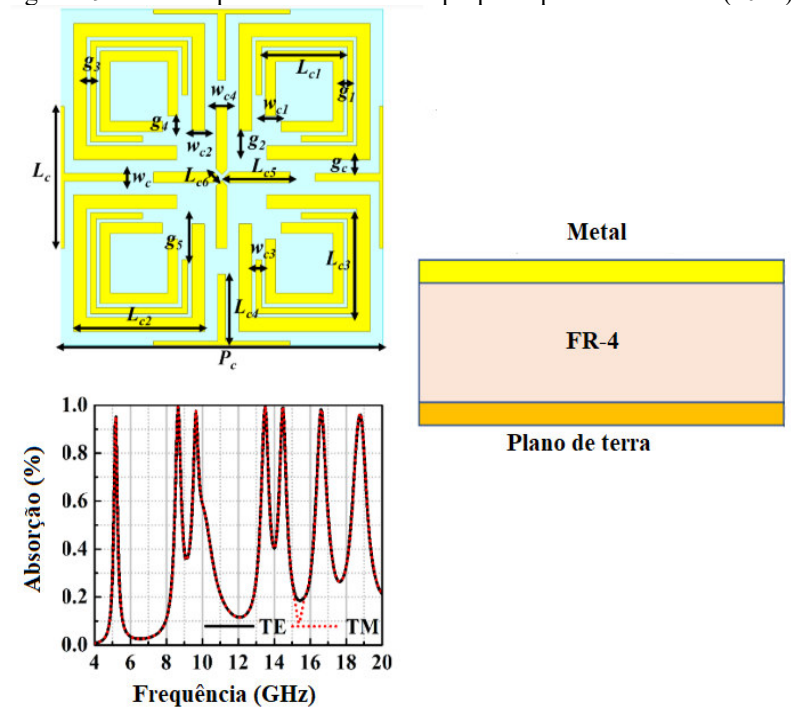
Figura 48 - Metassuperfície absorvedoras multicamadas propostas por Routray e Ghosh (2024).



Fonte: Adaptado de Routray e Ghosh (2024).

Foi desenvolvido por Pati e Sahoo (2024) um absorvedor de micro-ondas ultrafino e insensível à polarização, baseado em metamaterial, projetado para exibir comportamento ressonante em sete frequências consecutivas nas bandas C, X, Ku e K, com uma taxa de absorção média de 97,73%. Utilizou-se um substrato de FR-4 com 1,6 mm de espessura e um plano de terra completo. A metassuperfície proposta é composta por quatro células unitárias, cada uma contendo três ressonadores quadrados não uniformes com fendas diagonais e pares complementares em forma de T, além de ressonadores de pontas afiadas posicionados centralmente (Figura 49). O absorvedor demonstrou alta estabilidade angular, com polarização horizontal estável até 70° e vertical até 60°. Além disso, foi avaliado quanto à sua capacidade de melhorar a relação frente-costa de uma antena monopolo na banda, otimizando os padrões de radiação e mitigando interferências de direções indesejadas, e na minimização da seção transversal do radar biestático em incidência normal.

Figura 49 - Metassuperfície absorvedora proposta por Pati e Sahoo (2024).



Fonte: Adaptado de Pati e Sahoo (2024).

Para fornecer uma comparação entre os trabalhos no estado da arte com a estrutura absorvedora desenvolvida neste trabalho de tese, a Tabela 1 apresenta informações quanto à referência, ano, geometria, tamnhos físicos e elétricos da célula unitária, frequência (s) de ressonância (s), máximo(s) pico(s) de absorção, banda(s) de operação e existência do plano de terra.

Tabela 1 - Comparação entre os trabalhos do estado da arte e trabalho desta tese (Continua).

Ref./ Ano	Geometria	Tamanho Físico (mm^3) Tamanho elétrico	Freq. (GHz)	Máx. absorção	Bandas de operação	Plano de terra
Zeng *et al.* (2018)	Cruz Jerusalém e Anel circular	13,8 × 13,8 ×1 0,2024 λ_0 × 0,2024 λ_0 × 0,0147 λ_0	4,4; 6,05; 14,2	94,3%; 96,6%; 99,5%	C e Ku	Sim
Singh; Abegaonkar; Koul (2019)	Anéis circulares modificados	14 × 14 ×0,50 0,1956 λ_0 × 0,1956 λ_0 × 0,0069 λ_0	4,19; 6,64; 9,95	97,50%; 96,50%; 98,85%	C e X	Sim
Kalraiya *et al.* (2019)	Formato circular interligadas por uma geometria em forma de cruz	8 × 8 × 0,80 0,2794λ_0 × 0,2794λ_0 × 0,0279λ_0	10,48	97%	X	Sim
Deng *et al.* (2020)	Combinação SRR, anel quadrado modificado e geometria em forma de 7	8 × 8 × 0,40 0,2266λ_0 × 0,2266λ_0 × 0,0113λ_0	8,5; 13,5; 17	99,9%; 99,5%; 99,9%	X e Ku	Sim
Moniruzzaman *et al.* (2020)	Anel circular divido assimétrico	8 × 8 × 1,5 0,1093λ_0 × 0,1093 λ_0 × 0,0205λ_0	4,1; 6,86; 11,3; 13,45	97,9%; 99,1%, 99,5%; 99,95%	C; X e Ku	Sim
Hannan *et al.* (2020)	Anel dividido simétrico segmentado e modificado	9 × 9 × 1,6 0,3369 λ_0 × 0,3369 λ_0 × 0,0599 λ_0	11,23; 14,18; 17,37; 19,18	85,51%, 99,13%; 98,19%; 90,8%	X, Ku e K	Sim
Edries *et al.* (2020)	Combinação de ressonadores em formato I/quadrado	20 × 20 × 1,5 0.1498 λ_0 × 0.1498 λ_0 × 0.0119λ_0	2,248; 2,878; 4,3; 5,872	96%; 93%; 93%; 95%	S e C	Sim
Zhang *et al.* (2021)	Geometria baseada em espira quadrada modificada combinada com uma forma inspirada em asterisco	12 × 12×1 0,1488λ_0 × 0,1488λ_0 × 0,01240λ_0	3,72; 5,86; 10,54	99,5% 99,3% 99,2%	S; C e X	Sim
Puri; Singh (2021)	Anel quadrado com um *patch* simétrico dentro do anel mais interno	7,2 × 7,2 × 0,8 0,1140 λ_0 × 0,1140λ_0 × 0,0126λ_0	4,75; 9,47; 14,40	99,96%; 99,98%; 99,62%.	C; X e Ku	Sim
Luo *et al.* (2021)	Dipolo cruzado e ressonador circular	14 × 14 × 1 0,2072λ_0 × 0,20720λ_0 × 0,01480λ_0	4,44; 7,85	99,93%; 99,99%,	C	Sim
Jain *et al.* (2021)	Ressonadores quadrados modificados	10 × 10 × 1,6 0,1120 λ_0 × 0,1120λ_0 × 0,01792λ_0	3,36; 3,95; 10,48	99,42%; 99,10%; 99,90%	S e X	Sim
Hannan *et al.* (2021)	Estrutura quiral em forma de suástica no centro do *patch*	12 × 12 × 1,6 0,1695 λ_0 × 0,1695λ_0 × 0,2054λ_0	4,238; 7,836; 10,482; 11,014; 13,352	99,76%; 94,97%, 98,55%, 98,54%; 99,15%	C; X e Ku	Sim

λ_0 – Comprimento de onda considerando a menor frequência de ressonância

Tabela 1 - Comparação entre os trabalhos do estado da arte e trabalho desta tese (Final).

Ref./ Ano	Geometria	Tamanho Físico (mm^3)					
		Tamanho elétrico	Freq. (GHz)	Máx. absorção	Bandas de operação	Plano de terra
Afsar *et al.* (2022)	Combinação de um de anel octogonal fechado e duas tiras de metal de diapasão em forma de haltere	8 × 8 × 1,6 0,1720 λ_0 × 0,1720λ_0 × 0,0344λ_0	6,45; 14,89	99,15%; 99,76%,	C e Ku	Sim
Yousaf *et al.* (2022)	SRRs compostos por um anel externo quadrado, anéis circulares e uma geometria interna simétrica em forma de estrela	8 × 8 × 0,65 0,2133 λ_0 × 0.2133λ_0 × 0.0173λ_0	8,0; 13,1; 16,08; 19,2	99,69%; 99,99%; 97,59%; 99,99%	X, Ku e K	Sim
Hossain *et al.* (2022)	Ressonadores de anel dividido simétrico em formato de E duplo	10 × 10 × 1,6 0,1792 λ_0 × 0,1792λ_0 × 0,0286λ_0	5,376; 10,32; 12,25	99,9%, 99,9%; 99,7%	C e X	Sim
Hakim *et al.* (2022)	Ressonador de anel dividido quadrado modificado	9 × 9 × 1,6 0,4385 λ_0 × 0,43852λ_0 × 0,0779λ_0	14,62; 16,30	99,99% 99,99%	Ku	Sim
Dey e Dey (2022)	Geometria modificada da cruz de Jerusalém	3,5 × 3,5 × 0,5 0,1488λ_0 × 0,1488λ_0 × 0,0226λ_0	12,76; 22,54	99,88%; 99,1%	K e Ku	Sim
Shukoor e Dey (2022)	Ressonadores de anel circular simples	7,2 × 7,2 × 2,4 0,1920λ_0 × 0,1920λ_0 × 0,0640λ_0	11 pico de 8 à 22 GHz	≥ 94,6%	X; Ku e K	FSS
Bennaoum *et al.* (2023)	Ressonador circular de formato duplo T	18 × 18 × 1,53 0,3858λ_0 × 0,3858λ_0 × 0.0327λ_0	6,43; 9,10; 11,86; 14,67	89,40 %; 99,66%; 99,10%; 95,22%	C; X e Ku	Sim
Genikala, Ghosh e Roy (2023)	Ressonadores quadrado e hexadecagonais em forma de estrela	14,48 × 14,48 × 1,6 0,1158 λ_0 × 0,1158λ_0 × 0,0128λ_0	2,4; 5,5; 7,51	99,53 %; 99,33 %; 99,90 %	C e X	Sim
Jahan *et al.* (2023)	Combinação de ressoadores baseados em quadrados com abertura e ressoador em forma de H	8 × 8 × 0,58 0,1664λ_0 × 0,1664λ_0 × 0,0121λ_0	6,24; 10,608; 18,624	97,8%; 99,9%; 99,9%	C, X e K	Sim
Hakim *et al.* (2023)	SSRR com dois braços externos	8,90 × 8,90 × 1,6 0,0741 λ_0 × 0,0741λ_0 × 0.013λ_0	2.5; 4,9; 6	90%; 99%; 97%	C	Sim
Routray e Ghosh (2024)	Conjuntos alternados de anéis e anéis divididos com uma estrutura cruzada no centro	7,2 × 7,2 × 1 0.1848λ_0 × 0.18481λ_0 × 0.0256λ_0	7,7; 11,1; 11,3; 13,1	98%; 95%; 91%; 99%	C; X e Ku	Sim
Pati e Sahoo (2024)	Ressonadores quadrados não uniformes com fendas diagonais, pares complementares em forma de T e ressonadores de borda afiada	12,7 × 12,7 × 1,6 0,2201λ_0 × 0.2201λ_0 × 0.0277λ_0	7 picos de 5 à 19 GHz	≥ 99%	C; X; Ku e K	Sim
Esta Tese	Geometria inspirada na forma da planta *Oxalis tetraphylla*	50 × 50 × 18,2 0,2750λ_0 × 0,2750λ_0 × 0,1001λ_0	1,65; 2,4; 3,51	98,66%; 99,67%; 98,62%	S e C	FSS

3.2 Considerações Parciais

Neste capítulo, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre estruturas de meio efetivo baseadas em metassuperfícies e Superfícies Seletivas em Frequência. Esse estudo teve como objetivo analisar o progresso na área e comparar as funcionalidades dos absorvedores descritos na literatura com as características inovadoras do absorvedor desenvolvido nesta tese, que utiliza uma geometria bioinspirada integrada a uma metassuperfície de meio efetivo. A proposta combina uma FSS do tipo *patch* como substituto do plano de terra para alcançar uma resposta do tipo absorve/transmite, com independência de polarização, estabilidade angular e bandas de frequência minimamente espaçadas para as bandas S (1,65 GHz) e C (2,4 GHz e 3,51 GHz).

CAPÍTULO 4

4 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos estabelecidos, a metodologia adotada foi estruturada em cinco etapas principais: na primeira, foi realizado o planejamento da pesquisa; na segunda, conduziu-se a análise de trabalhos para a elaboração do estado da arte; na terceira, desenvolveu-se o projeto e realizaram-se as simulações da estrutura utilizando o *software* comercial ANSYS *Electronics Desktop* 2023 R2, com ênfase no HFSS; a quarta etapa envolveu a fabricação e as medições do protótipo; por fim, a quinta etapa contemplou a redação e submissão de um artigo científico em revista especializada, bem como a escrita e defesa desta tese. Na Figura 50 é possível visualizar em detalhes as cinco etapas da metodologia deste projeto de tese.

Figura 50 - Descrição das etapas da metodologia.

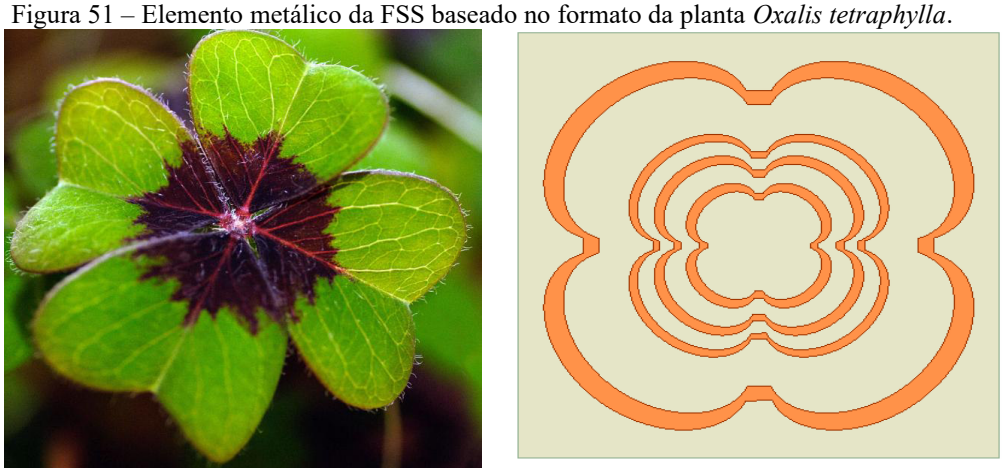
1ª Etapa: Planejamento da pesquisa	• Definir o tema • Determinar o objetivo geral e objetivos específicos • Realizar a revisão bibliográfica para a fundamentação teórica
2ª Etapa: Estado da Arte	• Pesquisar artigos publicados no campo de estudo, abrangendo o período de 2018 a 2024 • Apresentar estudos de absorvedores de micro-ondas utilizando metasuperfície absorvedoras em micro-ondas.
3ª Etapa: Projeto e Simulações	• Projetar a geometria usando a superfómula Gieles • Ajustar a geometria inspirada no formato *Oxalis tetraphylla* • Realizar as análises númericas da estrutura • Extrair os parâmetros efetivo da estrutura • Analisar os resultados das simulações • Fabricação dos protótipos
4ª Etapa: Análises experimentais	• Validação dos resultados númericos e experimentais
5ª Etapa: Publicações e Defesa Final	• Escrita e submissão do artigo com resultados da pesquisa para periódicos da área • Preparação do documento final de defesa de tese

Fonte: Autoria Própria.

4.1 Projeto e Simulação da FSS Inspirada na Forma *Oxalis Tetraphylla*

Esta etapa corresponde à fase 3 da metodologia apresentada na Figura 51. As simulações do projeto foram conduzidas no *software* HFSS[1], um *software* de simulação eletromagnética 3D integrado ao *ANSYS Electronics Desktop*[2]. O primeiro passo do projeto consistiu na simulação de uma FSS do tipo *patch*, cujo elemento metálico foi inspirado na forma da planta *Oxalis tetraphylla*, conforme ilustrado na Figura 51.

Figura 51 – Elemento metálico da FSS baseado no formato da planta *Oxalis tetraphylla*.



Fonte: Autoria própria.

A escolha de uma geometria bioinspirada para o projeto da superfície seletiva em frequência (FSS) e do absorvedor baseia-se em suas vantagens técnicas, especialmente quanto à flexibilidade de *design.* Essa abordagem permitiu um uso mais eficiente da célula unitária na frequência inferior (1,6 GHz), favorecendo a miniaturização da estrutura. Isso se deve ao fato de que geometrias bioinspiradas contribuem para o aumento do comprimento elétrico efetivo sem a necessidade de expandir as dimensões físicas da célula. A inovação dessa estratégia reside na aplicação de padrões encontrados na natureza para otimizar o desempenho eletromagnético, refletindo uma tendência crescente e promissora na área de engenharia de dispositivos eletromagnéticos.

A implementação de uma geometria baseada em anéis ou espiras deve-se às vantagens associadas a esse tipo de configuração como por exemplo maior estabilidade angular e insensibilidade à polarização. Assim, ao adotar essa geometria, além de atender aos requisitos

[1] https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss
[2] https://www.ansys.com/products/electronics

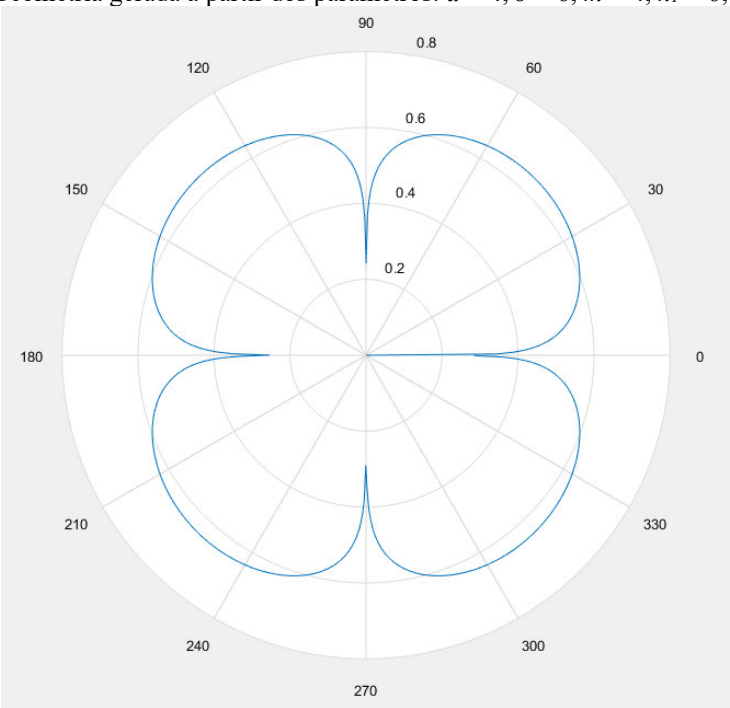
de desempenho, o projeto oferece uma solução inovadora e eficiente para o *design* de absorvedores de micro-ondas.

A geometria foi derivada utilizando a superfórmula de Gielis. O padrão inicial foi desenvolvido no *software* Matlab®, por meio da implementação da Equação (22). A definição empírica dos parâmetros da superfórmula permitiu ajustar a forma da estrutura com base em características específicas: o parâmetro 'a' controla a quantidade de pétalas; 'b' define a largura entre elas; 'm' também influencia a quantidade de pétalas, funcionando em conjunto com 'a' o 'n_1' ajusta a separação entre as pétalas; e os parâmetros 'n_2' e 'n_3' determinam o formato da folha. Após o processo de parametrização, os valores finais adotados foram: $a = 4$, $b = 6$, $m = 4$, $n_1 = 6$ e $n_2 = n_3 = -1$.

A Figura 52 ilustra a forma da geométrica resultante gerada a partir dos parâmetros informados em a, b, m, n_1, n_2 e n_3.

Em seguida, foi usado o *software* LibreCAD[3], de acesso livre, para ajustar os detalhes do arquivo '*.dxf*' da geometria obtida no *software* Matlab®. Após os ajustes feito na geometria usando o LibreCAD (Figura 53), o arquivo '*.dxf*' foi exportado e depois foi importado para o *software* HFSS.

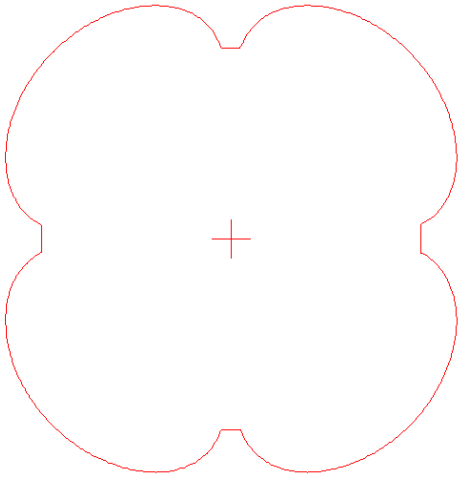
Figura 52 - Geometria gerada a partir dos parâmetros: $a = 4$, $b = 6$, $m = 4$, $n_1 = 6$, $n_2 = n_3 = -1$.



Fonte: Autoria própria.

[3] https://librecad.org/

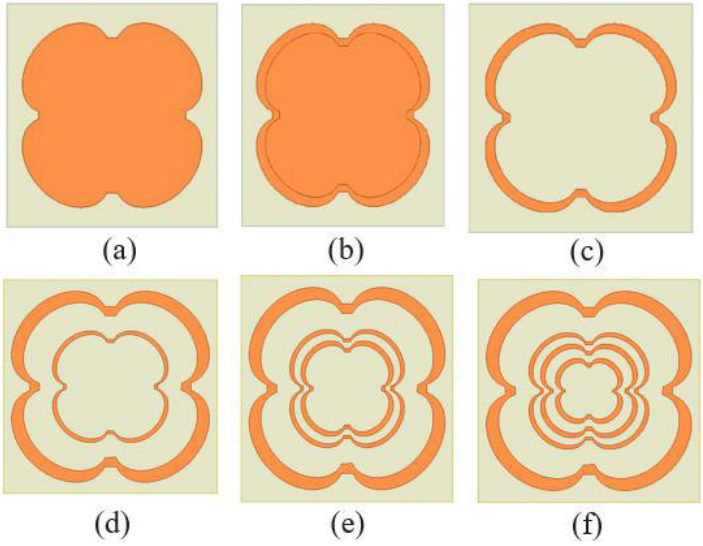
Figura 53 - Geometria após ajustes feito no *software* LibreCAD.



Fonte: Autoria própria.

A partir do comando de copiar e colar e do comando '*scale*' no HFSS, foram geradas quatro espiras com diferentes escalas da geometria original. As dimensões da escala aplicadas em cada espira foram, respectivamente: 1,59 × 1,40 (primeira espira), 0,93 × 0,87 (segunda espira), 0,75 × 0,68 (terceira espira) e 0,52 × 0,45 (quarta espira). Após a replicação com essas proporções, foi aplicada a operação de subtração entre as formas, resultando na geometria final apresentada. A Figura 54 ilustra as etapas para a obteção dos anéis baseado na forma da planta *Oxalis tetraphylla.*

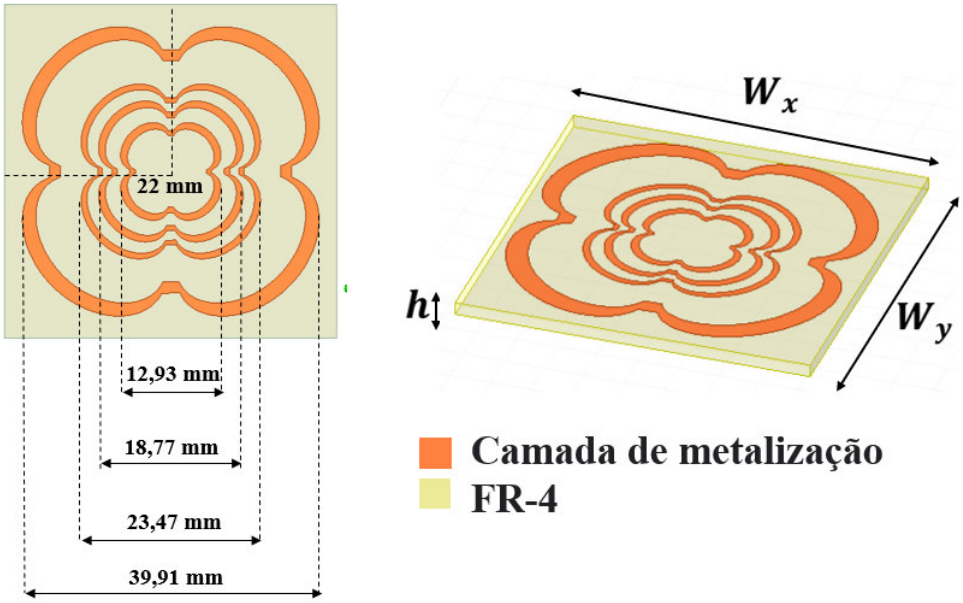
Figura 54 - Etapas de construção da geometria final: (a) Geometria ajustada no LibreCAD e importada para o HFSS; (b) padrão copiado com escala 1,59×1,40; (c) aplicação do comando de subtração para obtenção da primeira espira; (d) segunda espira; (e) terceira espira e (f) quarta espira.



Fonte: Autoria própria.

O substrato dielétrico empregado foi o FR-4 com o ε_r = 4,4 e tangente de perdas de 0,02 e espessura (h) de 1,6 mm e a periodicidade da célula foi de $W_x = W_y = 44$ mm, como visto na Figura 55.

Figura 55 - Célula unitária da FSS: (a) Vista frontal e (b) Vista em perspectiva.



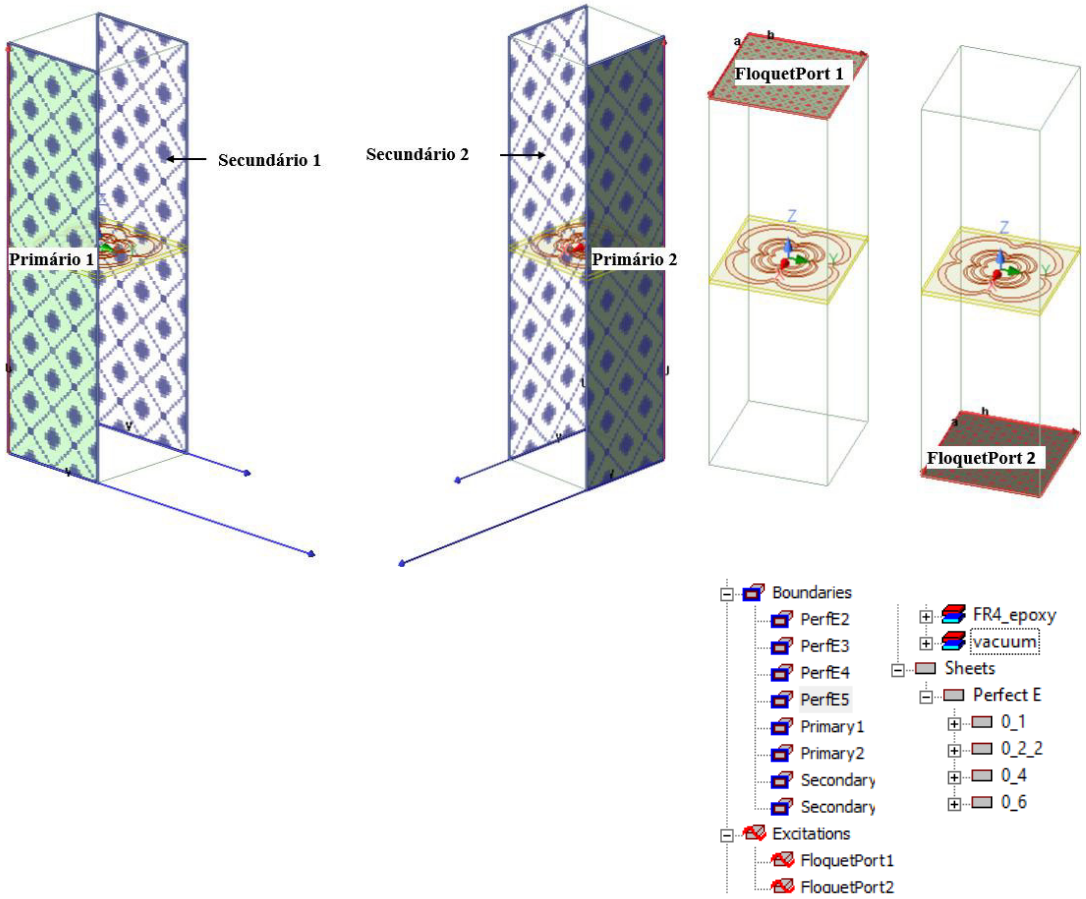
(a) (b)

Fonte: Autoria própria.

Foi utilizada como fonte de excitação a *FloquetPort*, com condições de contorno (primário e secundário), *PerfE* (parte metalizada da geometria), uma caixa de irradiação com altura (75 mm) equivalente a $\lambda/4$ calculada com base na menor frequência da faixa, foi utilizada. A configuração de varredura utilizada foi *Sweep* tipo interpolação usando a opção *Linear Step* de 1 a 4 GHz com passo de 10 Mz totalizando 301 pontos. A FSS foi projetada para operar nas faixas de frequência de 1,6 GHz, 2,5 GHz e 3,5 GHz.

Na Figura 56 pode ser visto em detalhes as condições de contorno usados para realização da simulação da célula unitária da FSS proposta.

Figura 56 - Condições de contorno usadas para simulação célula unitária da FSS.



Fonte: Autoria própria.

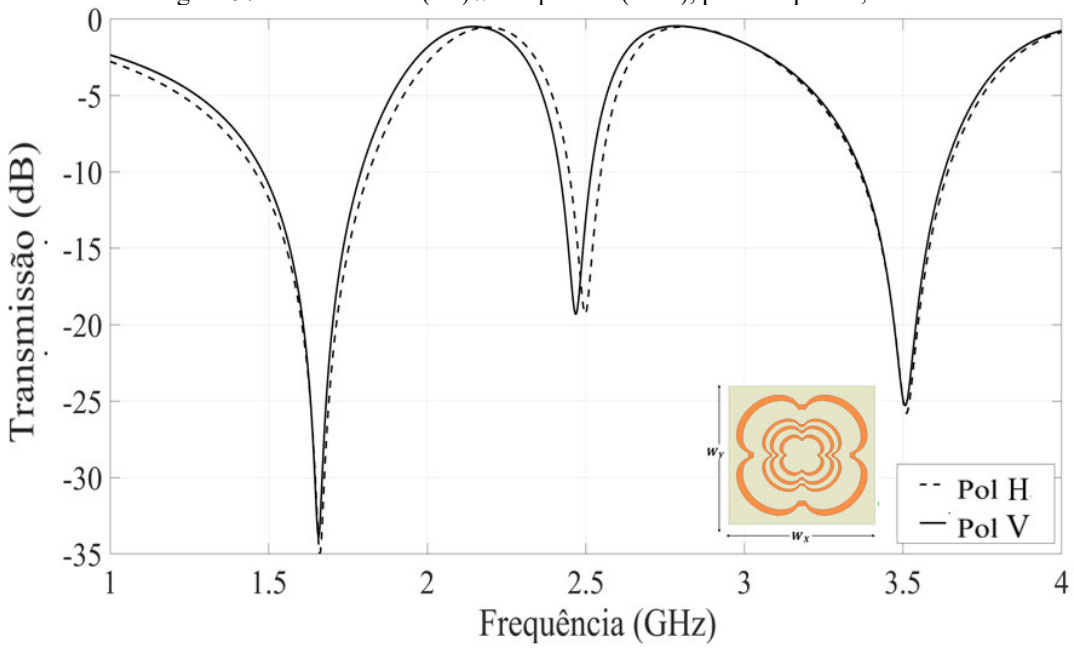
Na Figura 57 pode ser vista a resposta em frequência da FSS projetada e simulada para polarizações horizontal e vertical. A primeira ressonância foi observada em 1,66 GHz, com uma banda de rejeição a -10 dB variando de 1,46 GHz a 1,81 GHz. A segunda ressonância ocorreu em 2,49 GHz, com uma banda de rejeição a -10 dB entre 2,45 GHz e 2,55 GHz. Já a terceira ressonância foi identificada em 3,51 GHz, com a banda de rejeição a -10 dB estendendo-se de 3,36 GHz a 3,64 GHz.

No projeto analisado, a FSS apresentou uma relação de frequências de 1,50 entre a segunda e a primeira ressonâncias, e de 1,41 entre a segunda e a terceira. A relação de frequências ($f_R - Ratio\ Frequency$), é um parâmetro utilizado para avaliar o espaçamento entre diferentes bandas de ressonância em um dispositivo multibanda, como uma FSS. Ela é calculada dividindo a frequência mais alta pela mais baixa entre duas bandas consecutivas de operação. Quando essa razão é menor que 2 (ou seja, $f_R < 2$), considera-se que as bandas estão próximas (Al - Joumayly; Behdad, 2010; Oliveira *et al.*, 2024).

Os resultados obtidos nas análises numéricas da FSS proposta confirmam que as bandas de ressonância estão próximas entre si. Ressalta-se que o desenvolvimento de FSS com frequências próximas tem aplicações específicas, especialmente em sistemas de comunicação multibanda e no controle de interferência eletromagnética. Esse tipo de estrutura é particularmente útil para filtrar ou absorver sinais em faixas de frequência levemente espaçadas, sendo uma solução eficiente para dispositivos que operam simultaneamente em múltiplas bandas, como antenas para redes móveis, Wi-Fi e outros sistemas sem fio.

A principal vantagem da FSS desenvolvida está na sua capacidade de otimizar o desempenho multibanda de forma compacta e eficaz, proporcionando uma resposta uniforme ao longo das bandas desejadas. Além disso, ao integrar múltiplas funcionalidades em uma única estrutura, reduz-se significativamente o espaço físico necessário, o que favorece a miniaturização e a integração em dispositivos modernos.

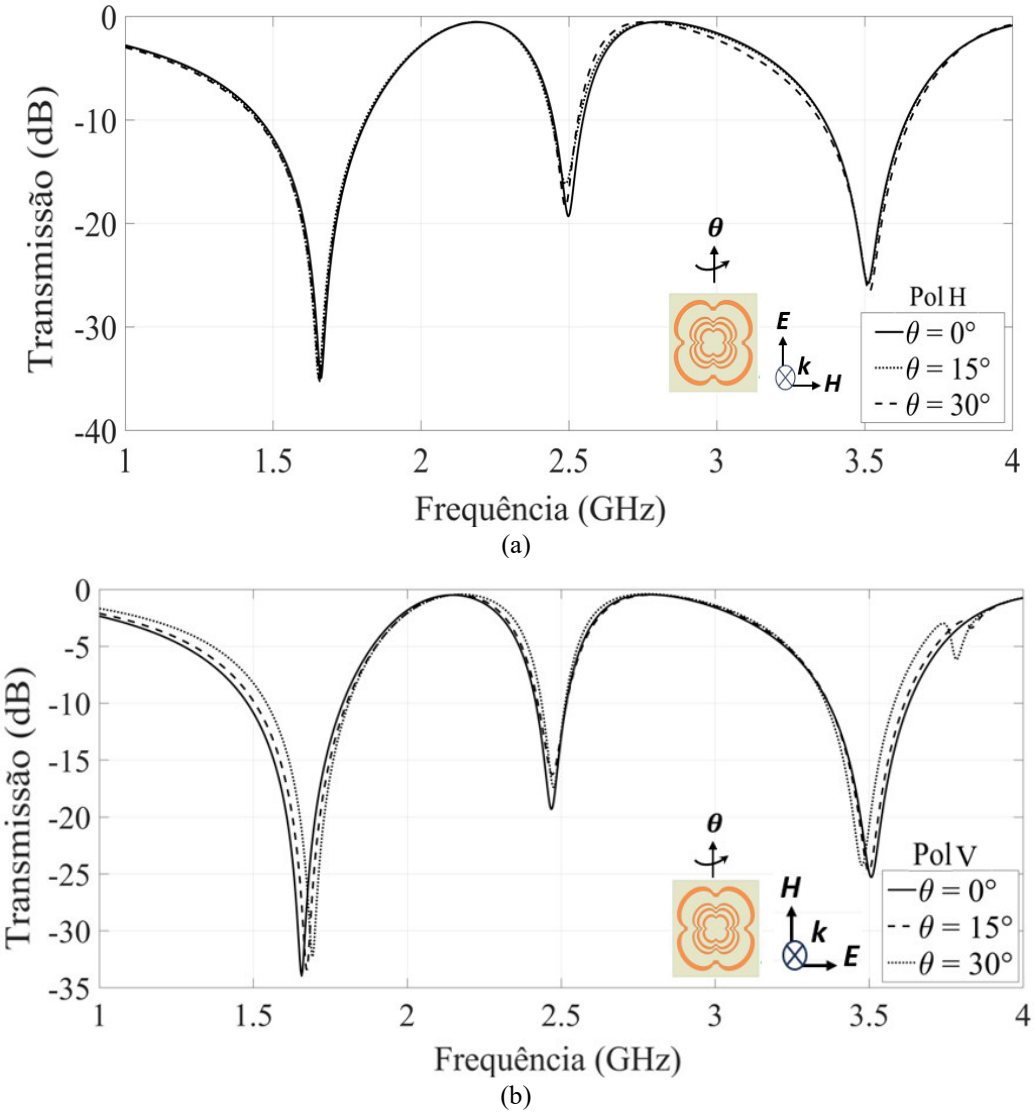
Figura 57 - Transmissão (dB) *x* Frequência (GHz), pol. H e pol. V, FSS.



Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 58 (a) e (b) pode-se observar a resposta da variação angular do ângulo θ da estrutura para as polarizações horizontal e vertical, respectivamente. A variação do ângulo de incidência da onda foi feita de 0 º a 30º, com intervalos de 15º. A estrutura demonstrou uma boa estabilidade para ângulos oblíquos de até 30º e foi insensível à polarização. Ressalta-se que a variação angular poderia ser estendida para ângulos superiores a 30°; no entanto, devido a limitações técnicas dos equipamentos utilizados durante o processo de simulação, as análises foram restringidas a ângulos de até 30°.

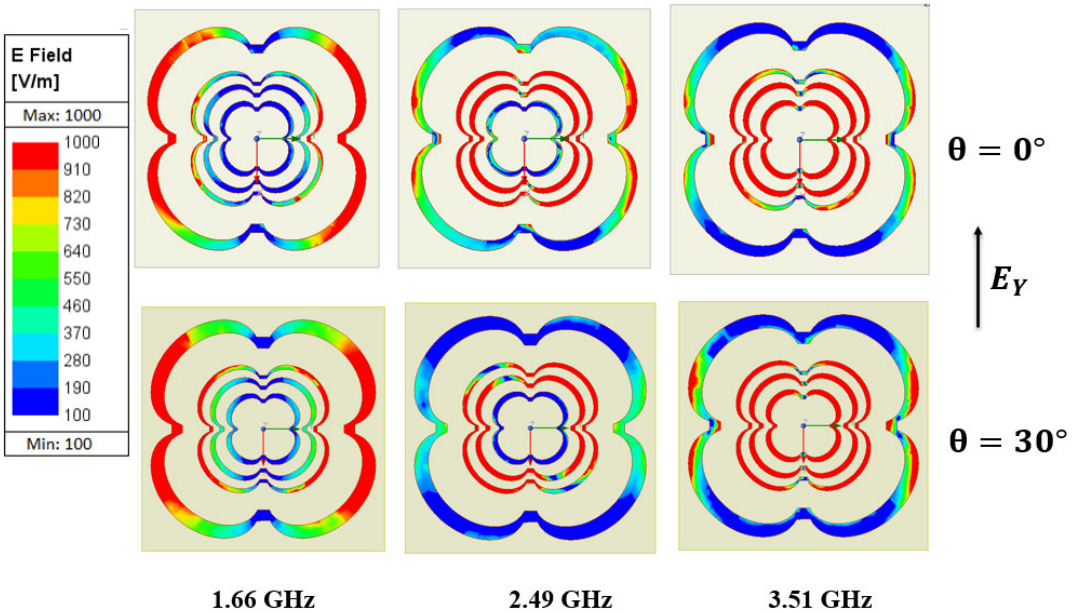
Figura 58 - Transmissão (dB) × Frequência (GHz), FSS: (a) pol. H e (b) pol. V, para θ = 0°, 15° e 30°.



Fonte: Autoria própria.

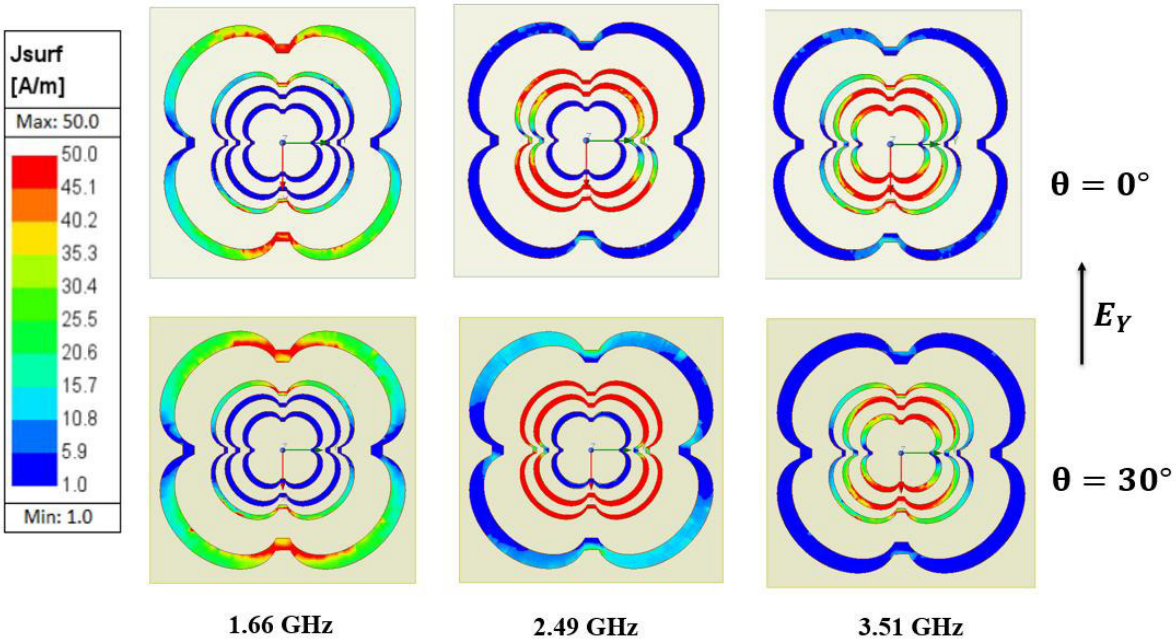
Também foram conduzidas análses para as distribuições do campo elétrico e da corrente de superfície na FSS para as respostas em frequências em 1,66 GHz, 2,49 GHz e 3,51 GHz considerando tanto a incidência normal quanto oblíqua a 30°. Pode-se observar que a ressonância em 1,66 GHz é predominantemente gerada pelo anel externo, enquanto a ressonância em 2,49 GHz é atribuída aos dois anéis intermediários. Já a ressonância em 3,51 GHz resulta da interação dos três anéis internos da estrutura. Essas características são ilustradas na Figuras 59 e 60.

Figura 59 - Distribuição de campo da FSS inspirada na forma de *Oxalis tetraphylla*.



Fonte: Autoria própria.

Figura 60 - Distribuição de corrente de superfície da FSS inspirada na forma de *Oxalis tetraphylla*.



Fonte: Autoria própria.

Foi notado que nas distribuições de 1,66 GHz, o campo elétrico e a densidade de corrente superficial apresentam maior intensidade no anel externo. Em 2,49 GHz, a intensidade concentra-se nos anéis intermediários. Por fim, em 3,51 GHz, a maior intensidade ocorreu nos anéis mais internos. Adicionalmente, as distribuições de densidade de corrente e de campo

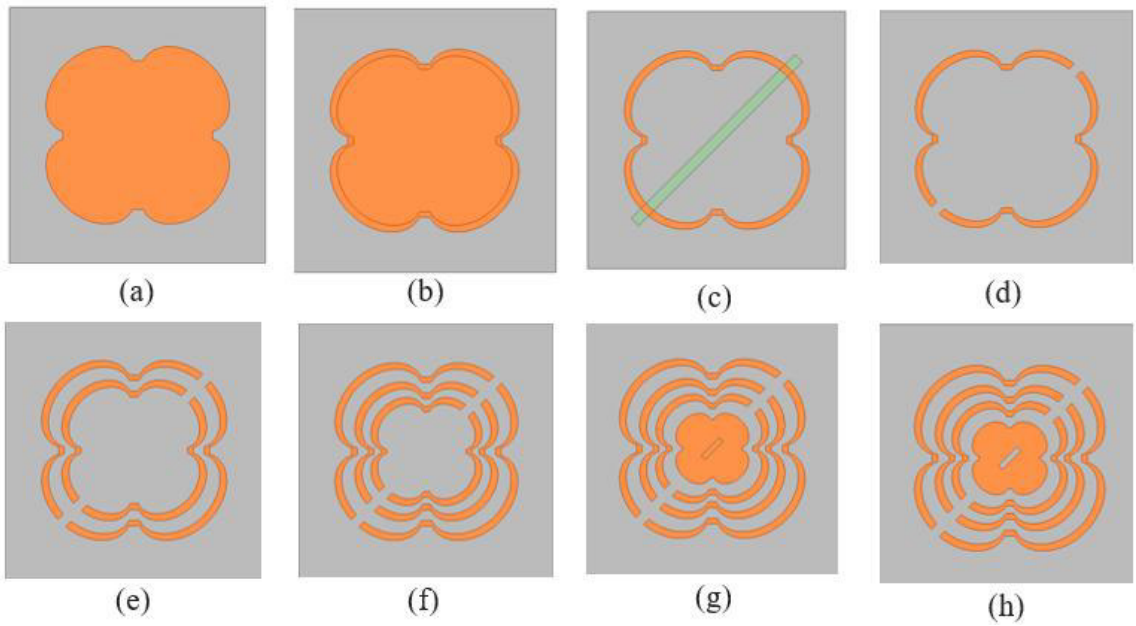
elétrico exibem uma simetria significativa, indicando estabilidade angular e independência em relação à polarização.

4.2 Projeto e Simulação da Metassuperfície e FSS como Plano de Terra

A segunda etapa das simulações consistiu na modelagem do absorvedor completo. Inicialmente, foi projetada a camada superior da estrutura, incorporando aberturas diagonais à geometria da célula unitária. O procedimento seguiu a mesma metodologia adotada anteriormente para a FSS, utilizando o padrão ajustado no LibreCAD, conforme ilustrado na Figura 53. A partir desse padrão, foram geradas variações em diferentes escalas da geometria original: a primeira espira utilizou escala de 1,4 × 1,3, seguida da adição de um retângulo rotacionado em 135°, com dimensões de 45 mm × 2 mm; em seguida, aplicou-se o comando de subtração, como ilustrado nas Figuras 61(a) a 61(d).

Para a criação da segunda e terceira espiras, foram aplicadas escalas de 1,095 × 0,99 e 0,85 × 0,75, respectivamente, conforme ilustrado nas Figuras 61(e) e 61(f). Para a última espira, utilizou-se a escala de 0,55, com a adição de um retângulo rotacionado em 135°, de dimensões 5 mm × 1 mm, conforme Figura 61(g). Após a replicação proporcional dessas formas, a operação de subtração foi novamente aplicada, resultando na geometria final exibida na Figura 61(h). Ressalta-se que todas essas dimensões foram definidas com base em um processo empírico de parametrização realizado ao longo das análises numéricas.

Figura 61 - Etapas para projeto da célula unitária da camada superior do absorvedor proposto.



Fonte: Autoria própria.

A adoção dessas aberturas trouxe melhorias significativas nas propriedades de metamaterial da estrutura. Primeiramente, a distribuição das correntes de superfície, favorecida pelas aberturas diagonais, permitiu uma manipulação mais eficiente das ondas eletromagnéticas, proporcionando maior controle sobre a propagação dessas ondas. Isso resultou em um desempenho superior na absorção, especialmente em comparação com geometrias tradicionais, como dipolos ou quadrados, que apresentam padrões de correntes mais simples. Além disso, as aberturas diagonais otimizaram o casamento de impedância da estrutura, melhorando a transferência de energia e minimizando reflexões, o que é fundamental para aumentar a eficiência na absorção. A geometria bioinspirada também ofereceu maior flexibilidade e inovação no *design* da célula unitária da metassuperfície absorvedora, permitindo uma resposta multibanda e melhor aproveitamento do espaço da célula unitária, particularmente na menor frequência da faixa, de 1,6 GHz. Combinadas, essas melhorias potencializaram as respostas metamateriais, resultando em um desempenho superior em termos de absorção e controle da propagação das ondas, destacando-se em relação a *designs* mais convencionais.

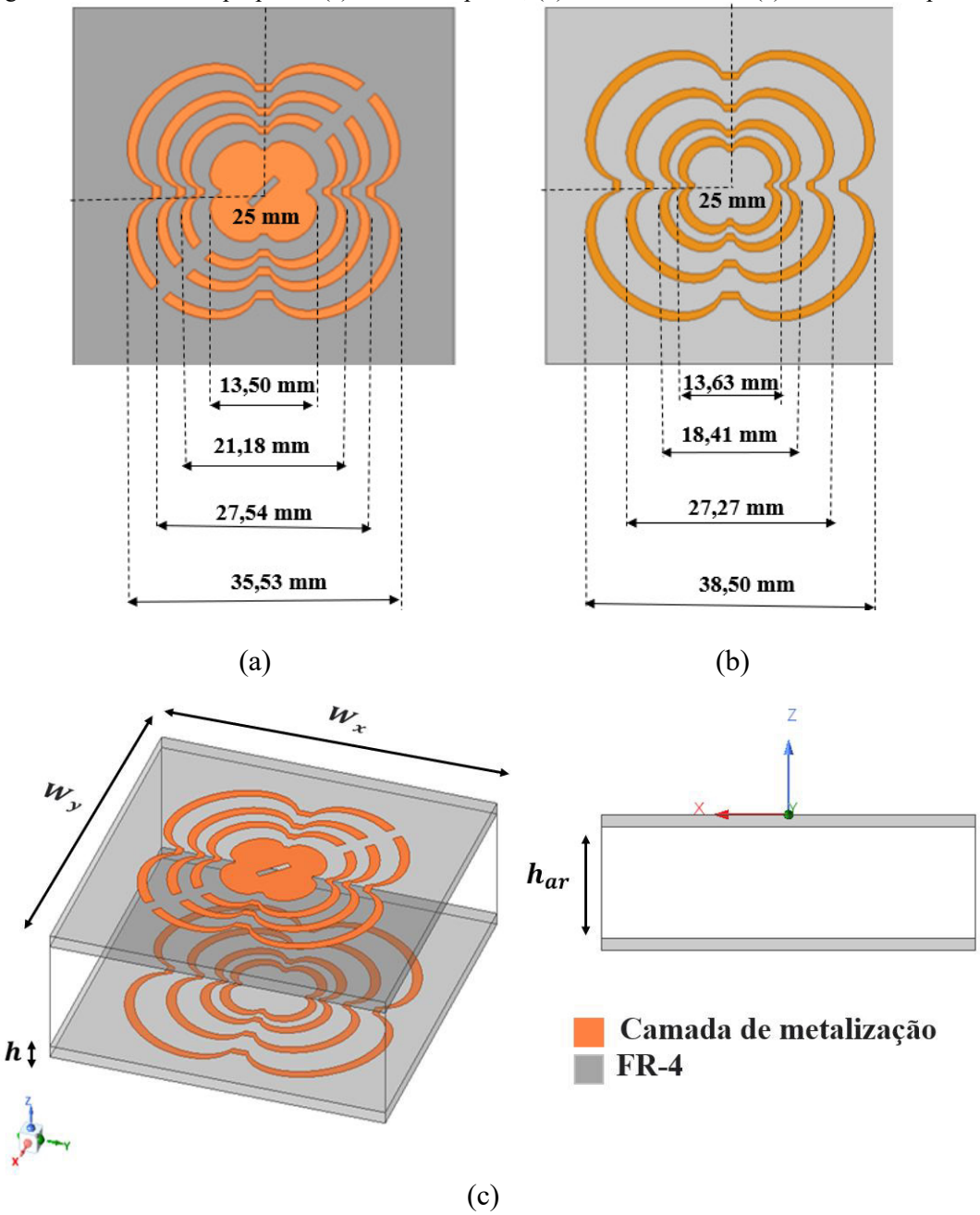
Como a estrutura analisada é uma metassuperfície de meio efetivo composta por três camadas, e estas são consideradas como materiais homogêneos (conforme explicado anteriormente), as análises do absorvedor proposto foram realizadas com a adição de uma camada inferior baseada em FSS, e uma caixa de ar (h_{ar}) de 15 mm foi utilizada para separar as camadas superior e inferior. Esse valor foi definido com base em um processo de parametrização. Ressalta-se que essa dimensão de 15 mm representa uma redução significativa em relação à espessura típica de uma tela de Salisbury convencional, que utiliza separação de λ/4 em relação ao comprimento de onda central. Tomando como referência a primeira frequência de ressonância da estrutura (1,66 GHz), a espessura λ/4 corresponderia a aproximadamente 45,2 mm, o que implica em uma redução de cerca de 67%.

Durante as análises, foi necessário ajustar as dimensões da FSS, resultando nas seguintes escalas aplicadas às espiras: 1,53 × 1,43 (primeira espira), 1,1 × 1 (segunda espira), 0,75 × 0,65 (terceira espira) e 0,55 × 0,45 (quarta espira). O procedimento adotado é semelhante ao ilustrado anteriormente na Figura 54.

Desta maneira, as análises numéricas foram conduzidas tanto para a camada de absorção quanto para a FSS, substituindo o plano de terra tradicional comumente usado em projetos de absorvedores baseados em metassuperfícies. Para as simulações foram utilizados dois substratos de FR-4 de ε_r = 4,4 e tangente de perdas de 0,02 e espessura (h) de 1,6 mm. A fonte de excitação utilizada foi o *FloquetPort*, com condições de contorno primário e secundário,

PerfE (parte metalizada da geometria), uma caixa de irradiação com altura (75 mm) equivalente a λ/4 calculada com base na menor frequência da faixa. A dimensão da célula unitária foi de $W_x = W_y = 50$ mm. A configuração de varredura utilizada foi *Sweep* tipo interpolação, usando a opção *Linear Step* de 1 a 4 GHz com passo de 10 MHz, totalizando 301 pontos. As análises foram realizadas considerando cada geometria em uma das faces do substrato de FR-4. Na Figuras 62 pode ser visualizada as três camadas projetadas para o absorvedor proposto. A estrutura foi projetada para operar nas faixas de frequência de 1,6 GHz, 2,45 GHz e 3,5 GHz.

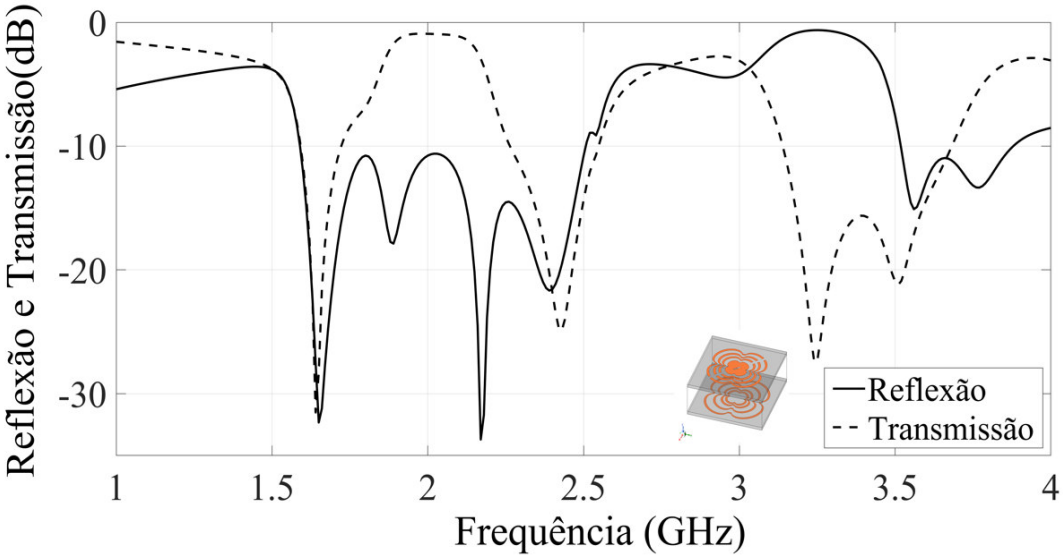
Figura 62 - Absorvedor proposto: (a) Camada superior, (b) Camada inferior e (c) Estrutura completa.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 63 apresentada a resposta em frequência para o coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$) e o coeficiente de transmissão ($|S_{21}|$) do absorvedor proposto. Nas faixas de frequência de 1,6 GHz, 2,45 GHz e 3,5 GHz, os coeficientes permanecem abaixo do limite de -10 dB, indicando que a estrutura opera como um absorvedor com características de absorção e transmissão. A baixa transmissão observada por meio do coeficiente de transmissão sugere que apenas uma fração mínima da energia incidente atravessa a estrutura, reforçando que a maior parte da energia é efetivamente absorvida, em vez de transmitida. Isso evidencia o desempenho eficiente da estrutura como um absorvedor eletromagnético.

Figura 63 - Análise numérica dos coeficientes de transmissão e reflexão do absorvedor proposto.



Fonte: Autoria própria.

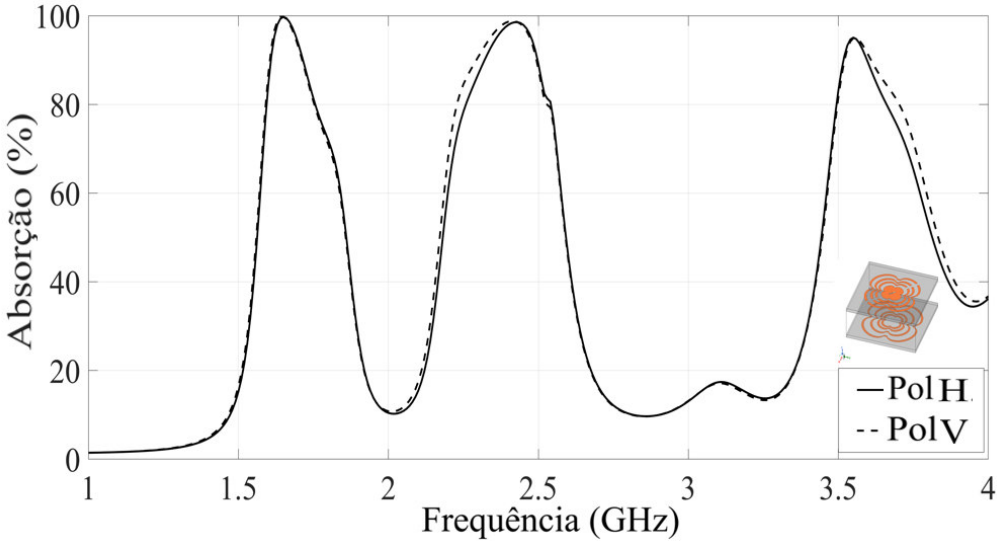
Para entender os princípios de funcionamento da estrutura proposta, pode-se considerar a absorção, definida como visto na Equação (17). Na Figura 64 é ilustrado os três picos de absorção alcançados para polarizações horizontal e vertical. Os picos máximos de absorção foram alvançados nas frequências de 1,66 GHz, 2,43 GHz e 3,56 GHz, com taxa de 99%, 99% e 95%, respectivamente. Pode-se ver que a estrutura é independente da polarização. Observou-se que a estrutura atingiu f_R de 1,46 entre a segunda e a primeira frequências, e de 1,47 entre a terceira e a segunda frequências nas bandas de absorção, podendo ser considerada frequência minimamente próxima já que $f_R < 2$ (Al-joumayly; Behdad, 2010; Oliveira *et al.,* 2024).

Ressalta-se que as ressonâncias de absorção minimamente próxima desempenham um papel fundamental em diversas aplicações tecnológicas, especialmente em sistemas que exigem operação multibanda. A estrutura foi desenvolvida para ser utilizada na absorção seletiva de

sinais interferentes, sendo uma alternativa para aprimorar o desempenho de antenas e filtros em sistemas de telecomunicações.

Além disso, o absorvedor projetado tem um papel essencial na mitigação de interferências eletromagnéticas (EMI), contribuindo para a redução de ruídos indesejados aumentando a imunidade eletromagnética de dispositivos eletrônicos.

Figura 64 - Análise numérica da absorção do absorvedor proposto, pol. H. e pol. V.

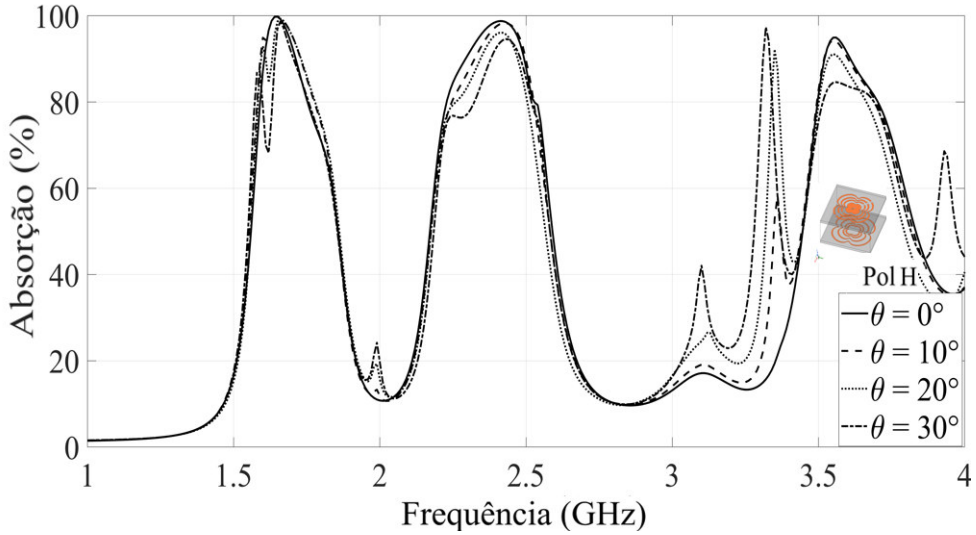


Fonte: Autoria própria.

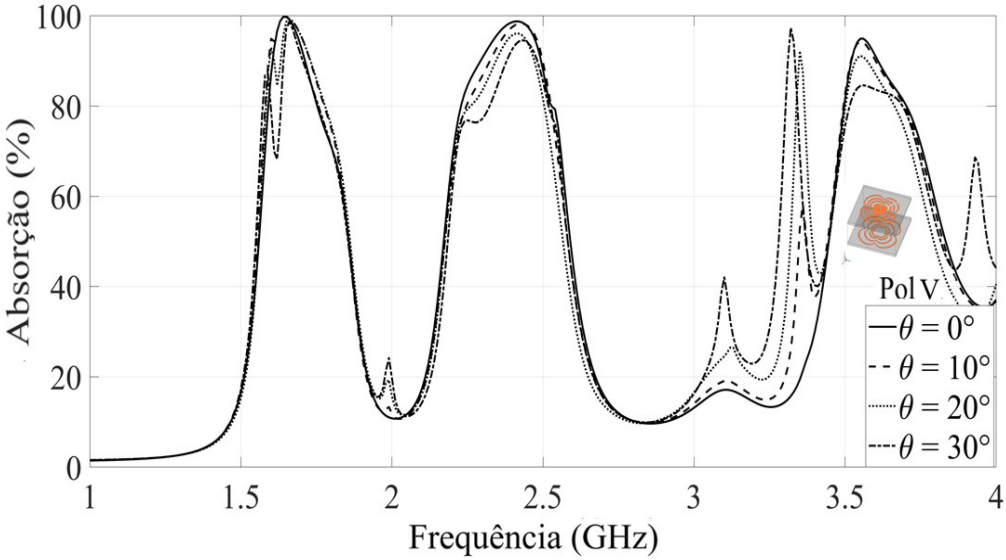
A estabilidade angular do absorvedor foi verificada para ângulos normais e oblíquos de até 30º. Como observado, a estrutura apresenta boa estabilidade de absorção angular para ângulos de até 30º e independência de polarização, como pode ser visto nas Figura 65(a) e Figura 65(b).

Vale destacar que seria possível analisar ângulos maiores que 30°, porém, por restrições técnicas dos recursos computacionais disponíveis durante as simulações, a variação angular foi limitada a 30°.

Figura 65 - Análise numérica da estabilidade angular do absorvedor proposto: (a) pol. H e (b) pol. V.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

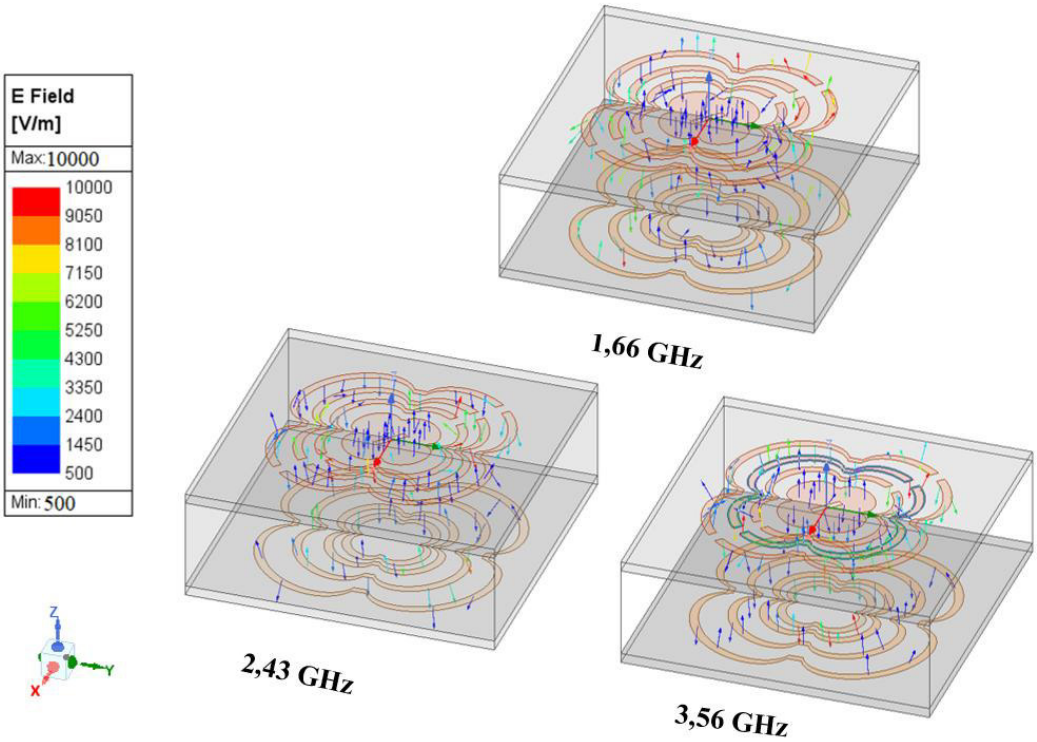
As Figuras 66 e 67 ilustram as distribuições do campo elétrico e da corrente de superfície para o absorvedor proposto considerando uma onda eletromagnética incidente sob incidência normal. Pode-se observar que, na primeira frequência de ressonância, a intensidade do campo está concentrada no primeiro e segundo anéis das camadas superior e inferior. Na segunda frequência de ressonância, a concentração de campo muda para o segundo e terceiros anéis dessas camadas. Finalmente, na terceira frequência de ressonância, a camada superior mostra uma distribuição de campo em toda a geometria, enquanto na camada inferior, a concentração é predominantemente no terceiro e no quarto anéis.

As distribuições vetoriais do campo elétrico e da corrente de superfície obtidas para as frequências de 1,66 GHz, 2,43 GHz e 3,56 GHz evidenciam que a estrutura proposta não utiliza

um plano de terra metálico contínuo, como ocorre em absorvedores tradicionais, mas sim uma FSS do tipo *patch* na camada inferior. Essa substituição é confirmada pela presença de atividade eletromagnética significativa abaixo da camada superior, o que não ocorreria se houvesse um plano metálico reflexivo, que bloquearia a propagação do campo.

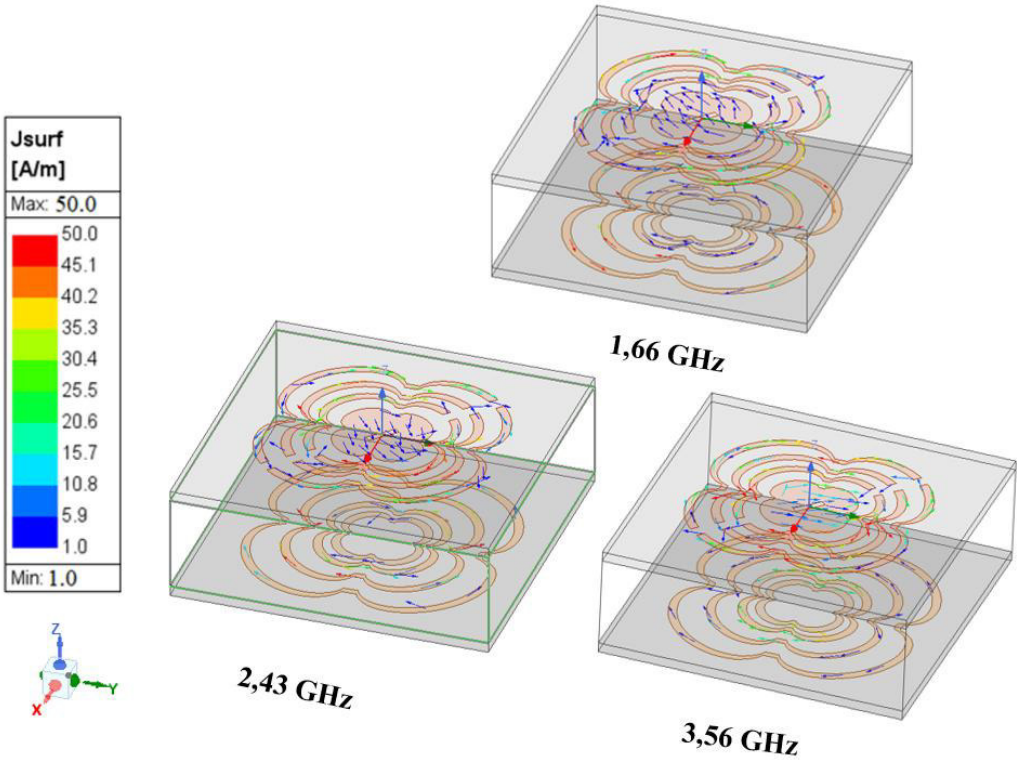
Além disso, observa-se a circulação de correntes entre as camadas, com padrões fechados que indicam o acoplamento entre os elementos ressonantes superiores e os *patches* inferiores. Essa interação gera dipolos magnéticos responsáveis pela absorção da onda eletromagnética, mecanismo típico de metassuperfícies absorvedoras. Portanto, o uso da FSS inferior no lugar do plano de terra não apenas possibilita a seletividade em frequência, como também contribui diretamente para o desempenho multibanda e a eficiência da absorção eletromagnética.

Figura 66 - Distribuição de campo do absorvedor proposto.



Fonte: Autoria própria.

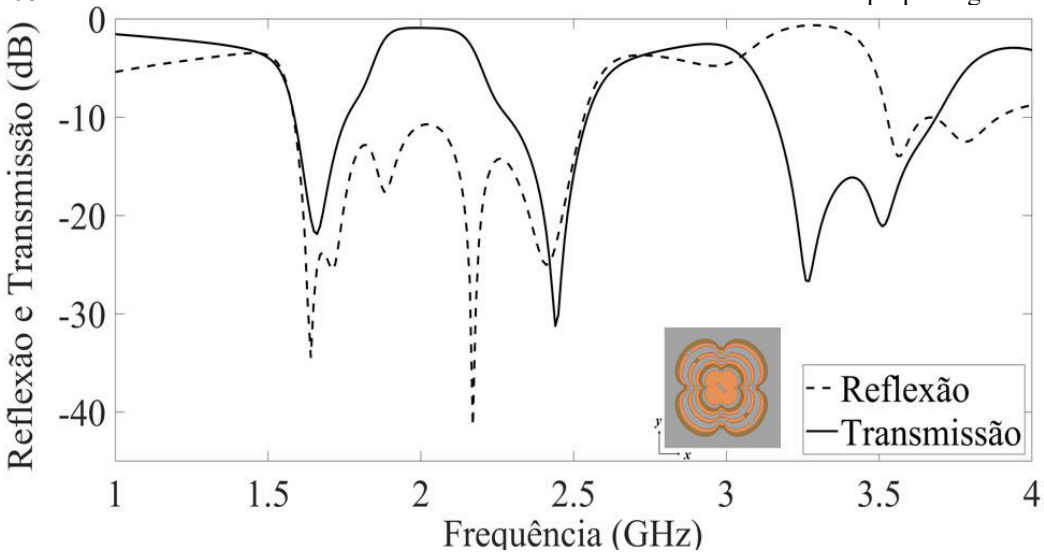
Figura 67 - Distribuição de corrente de superfície do absorvedor proposto.



Fonte: Autoria própria.

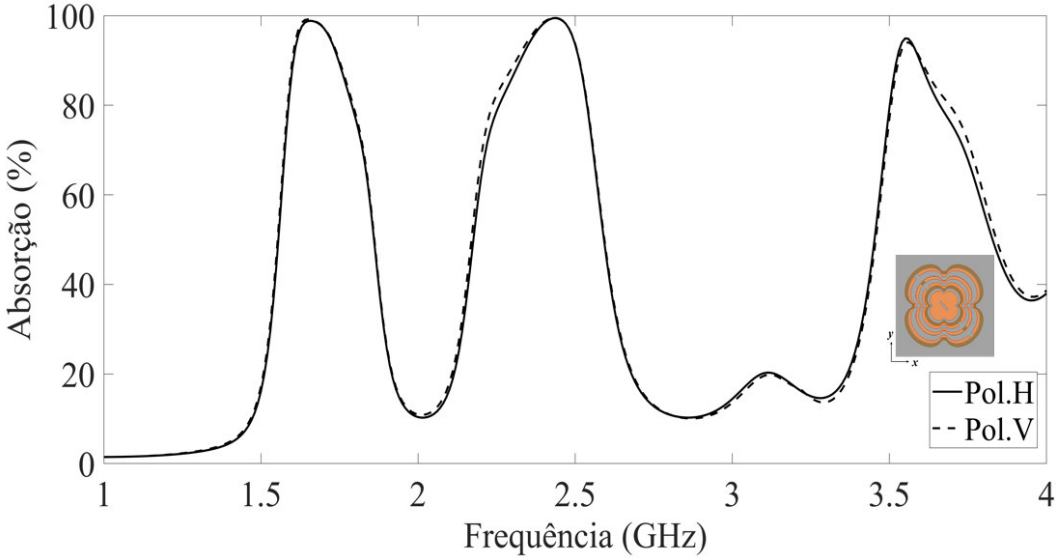
Uma análise adicional foi conduzida na estrutura, realizando uma rotação de 90° para a esquerda. Com essa modificação, as aberturas diagonais da camada superior foram realinhadas para a direção oposta. Conforme evidenciado pelos resultados numéricos, o coeficiente de reflexão, coeficiente de transmissão e a taxa de absorção apresentaram variações mínimas em relação aos resultados anteriores. Tanto o coeficiente de reflexão quanto o coeficiente de transmissão permaneceram abaixo do limite de referência de -10 dB nas faixas de frequência de 1,66 GHz, 2,43 GHz e 3,56 GHz, como pode ser visto na Figuras 68 e 69.

Figura 68 - Análise numérica dos coeficientes de transmissão e reflexão do absorvedor proposto girando 90°.



Fonte: Autoria própria.

Figura 69 - Análise numérica da absorção do absorvedor proposto, pol. H. e pol. V girando 90°.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Análises da Extração dos Parâmetros Efetivos da Estrutura Multicamada Simulada

A estrutura projetada pode ser classificada como uma estrutura de meio efetivo, que pode ser de camada única ou multicamada. Estruturas de meio efetivo exibem propriedades eletromagnéticas simplificadas, derivadas das características combinadas dos materiais que as compõem. Essas estruturas são descritas por valores efetivos de permissividade elétrica, permeabilidade magnética e impedância, permitindo uma análise mais direta de seu comportamento ao interagir com ondas eletromagnéticas (Coelho *et al.,* 2023).

A estrutura desenvolvida segue especificamente o modelo Médio Efetivo de Três Camadas (*Three-layer Effective Medium Model)*, pois consiste em dois substratos FR-4 e um espaço de ar. O modelo de meio efetivo de três camadas é uma estrutura conceitual usada para descrever estruturas que consistem em três camadas distintas, cada uma com suas próprias propriedades de material, como espessura, permissividade elétrica (ε) e permeabilidade magnética (μ). Em vez de analisar cada camada separadamente, este modelo se concentra no comportamento eletromagnético geral da estrutura. O termo "meio efetivo" refere-se a combinação coletiva das propriedades de todas as três camadas, resultando em um conjunto de características médias. Essas propriedades efetivas, incluindo permissividade elétrica efetiva (ε_{eff}), permeabilidade magnética efetiva ($\mu_{\boldsymbol{eff}}$), e impedância de entrada normalizada (Z_{eff}), podem ser otimizadas ajustando a geometria e a composição do material das camadas (Bhattarai *et al*., 2017).

Essa abordagem permite que a estrutura seja tratada como homogênea, simplificando os processos de análise e projeto. Uma das principais vantagens do modelo de meio efetivo de três camadas é sua capacidade de obter uma correspondência de impedância eficiente entre a estrutura e o espaço livre. Isso é crucial para minimizar a reflexão das ondas eletromagnéticas e maximizar a absorção. Essa correspondência é particularmente benéfica em aplicações que exigem absorção eficaz em várias bandas de frequência. Ao ajustar as propriedades do material das camadas e seu arranjo geométrico, é possível projetar estruturas que demonstrem alta eficiência de absorção em frequências específicas, oferecendo versatilidade em uma variedade de aplicações (Bhattarai *et al*., 2017).

Dessa maneira, a etapa seguinte do projeto foi realizar a extração dos parâmetros efetivos usando para isso pacotes de *software* comerciais. Desse modo, foram usados como base os procedimentos apresentados por Numan e Sharawi (2013). O método descrito pelos autores calcula as curvas para a permissividade elétrica e permeabilidade magnética complexa do metamaterial utilizando como base o seu elemento de unidade, o cálculo foi feito com o auxílio do *software* MATLAB. Os parâmetros S foram extraídos usando o HFSS R2 2023.

O método de extração empregado por Numan e Sharawi (2013) é conhecido como "S-parameter-retrieval method" (método de recuperação dos parâmetros S), foi usado o índice de refração e a impedância do material para derivar as propriedades de permissividade elétrica e permeabilidade magnética do material em teste. O processo de cálculo dessas propriedades é conduzido por meio de equações específicas (23) a (28), as quais são manipuladas com o auxílio de um *script* desenvolvido no ambiente MATLAB para este fim.

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - {S_{21}}^2}{(1-S_{11})^2 - {S_{21}}^2}} \tag{23}$$

$$e^{ink_0d} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11}.\frac{z-1}{z+1}} \tag{24}$$

$$n = \frac{1}{k_0 d}\left[\{Im[e^{nk_0d}] + 2m\pi\} - i\,.\{R_e[l_n(e^{ink_0d})]\}\right] \tag{25}$$

$$\varepsilon = \frac{n}{z} \tag{26}$$

$$\mu = nz \tag{27}$$

$$k_0 = \frac{2\pi\,.\,f}{3\,.\,10^8 m/s} \tag{28}$$

Vale destacar que as equações (26) e (27) fornecem expressões para a permissividade elétrica e permeabilidade magnética relativas, respectivamente, a partir do índice de refração e da impedância normalizada do meio. Ambas estão adimensionalizadas em relação ao vácuo, ou seja, expressam $\varepsilon_{r=}\ {}^{\varepsilon}/_{\varepsilon_0}$ e $\mu_{r=}\ {}^{\mu}/_{\mu_0}$, dispensando o uso explícito das constantes fundamentais do eletromagnetismo.

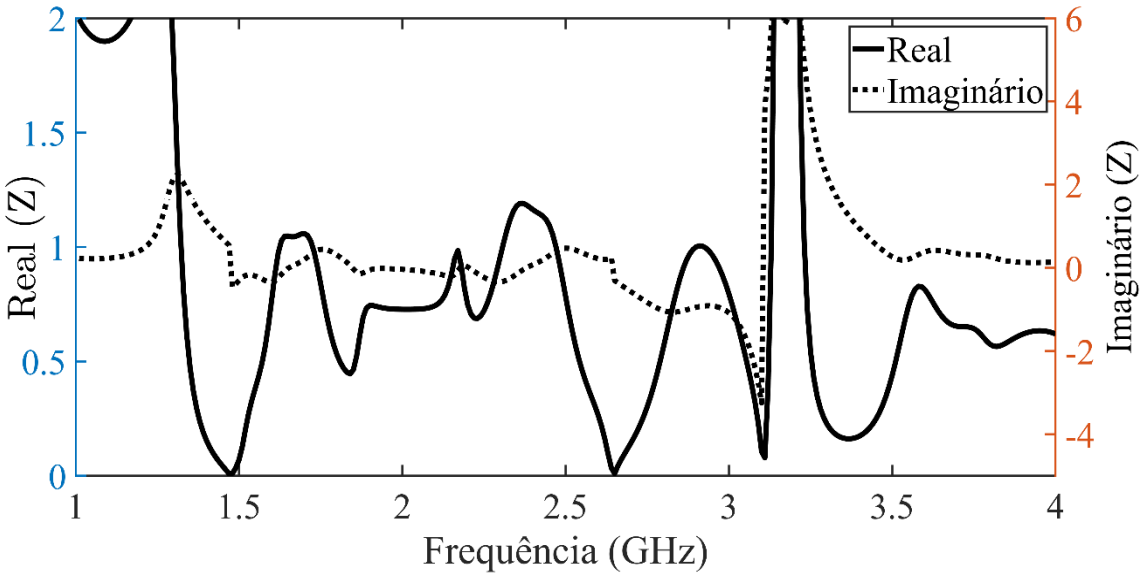
A etapa seguinte é exportar os valores de magnitude dos parâmetros S e a fase em radianos foram exportados em formato "*.csv*" para serem inseridos no *script* MATLAB. Em seguida, o código foi compilado, permitindo a obtenção dos gráficos da parte real e imaginária da permissividade elétrica efetiva, da permeabilidade magnética efetiva e da impedância efetiva.

A recuperação do parâmetro Z_{eff} foi importante para avaliar o casamento de impedância da estrutura como o espaço livre (o ar.) Esse fator foi essencial para otimizar a absorção de ondas eletromagnéticas, maximizando a eficiência do sistema e minimizando reflexões indesejadas.

Na Figura 70 é ilustrada a impedância de entrada normalizada simulada (Z_{eff}), onde a parte real de Z_{eff} permaneceu próxima da unidade, enquanto a parte imaginária se aproximou de zero. Esses resultados indicam reflexão mínima e absorção ideal, confirmando que a

estrutura atinge uma boa correspondência de impedância com a impedância do espaço livre (377 Ω). Dessa forma, evidencia-se que a técnica empregada para obtenção do absorvedor proposto foi a técnica de casamento de impedância, a qual visa igualar a impedância do absorvedor à do meio incidente, garantindo assim a máxima transferência de energia eletromagnética e, consequentemente, a máxima absorção.

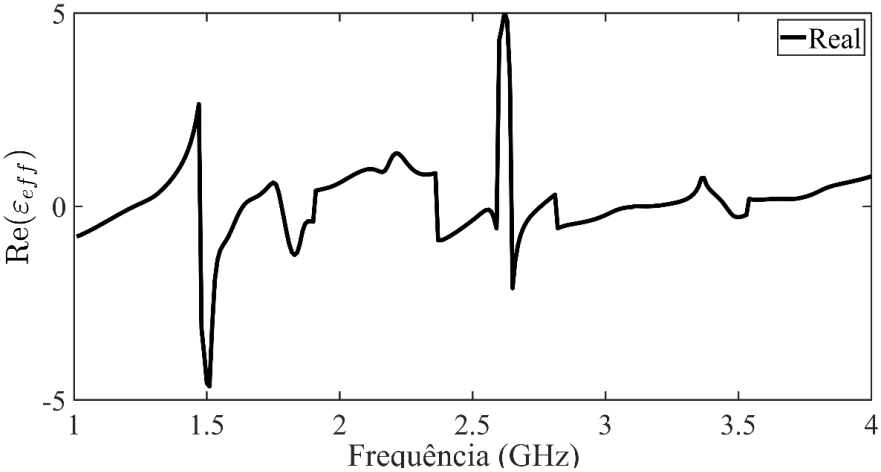
Figura 70 - Parte real e imaginária da impedância efetiva normalizada do absorvedor proposto.



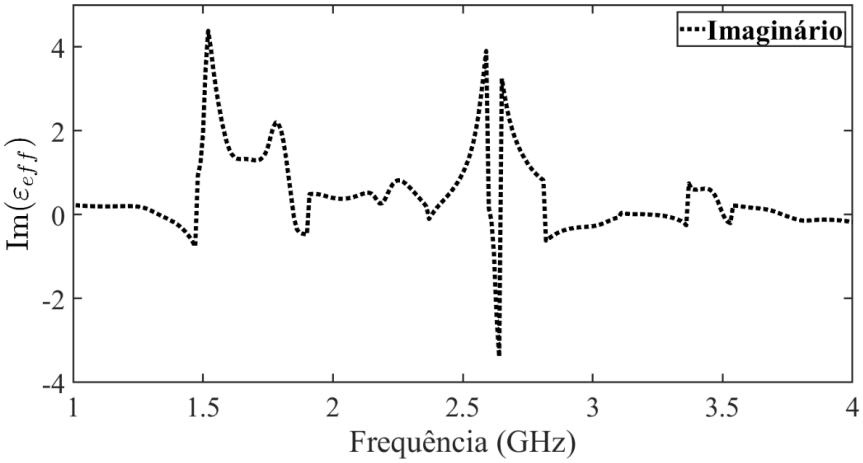
Fonte: Autoria própria.

As Figuras 71 (a)-(b) e 72 (a)-(b) ilustram os componentes reais e imaginários da permissividade elétrica efetiva (ε_{eff}) e permeabilidade magnética efetiva (μ_{eff}) da estrutura simulada, respectivamente. É observado que os valores efetivos da parte real da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética exibem variações entre valores positivos e negativos para as frequências de 1,66 GHz, 2,43 GHz e 3,56 GHz. Essa variação indica que a boa taxa de absorção alcançada para as frequências analisadas é consequência das respostas elétricas e magnéticas combinadas da estrutura.

Figura 71 - Parte real (a) e imaginária (b) da permissividade elétrica efetiva do absorvedor proposto.



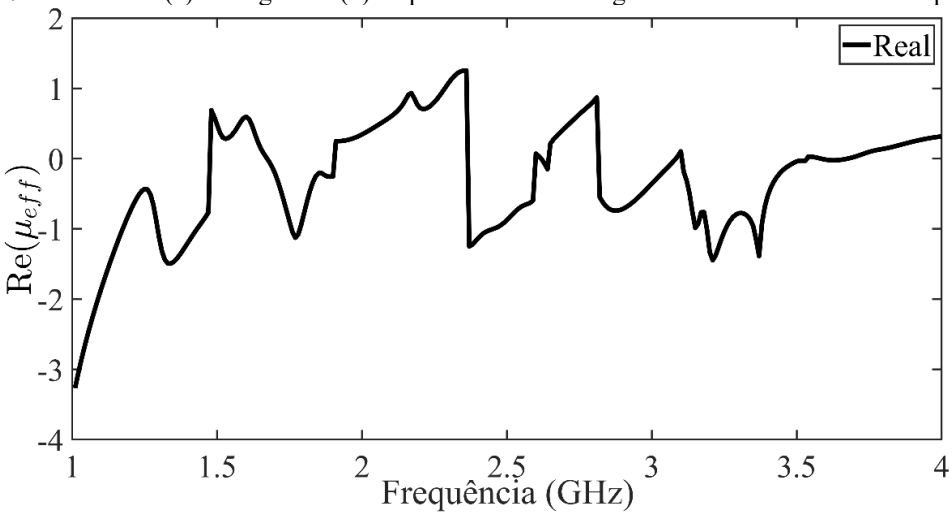
(a)



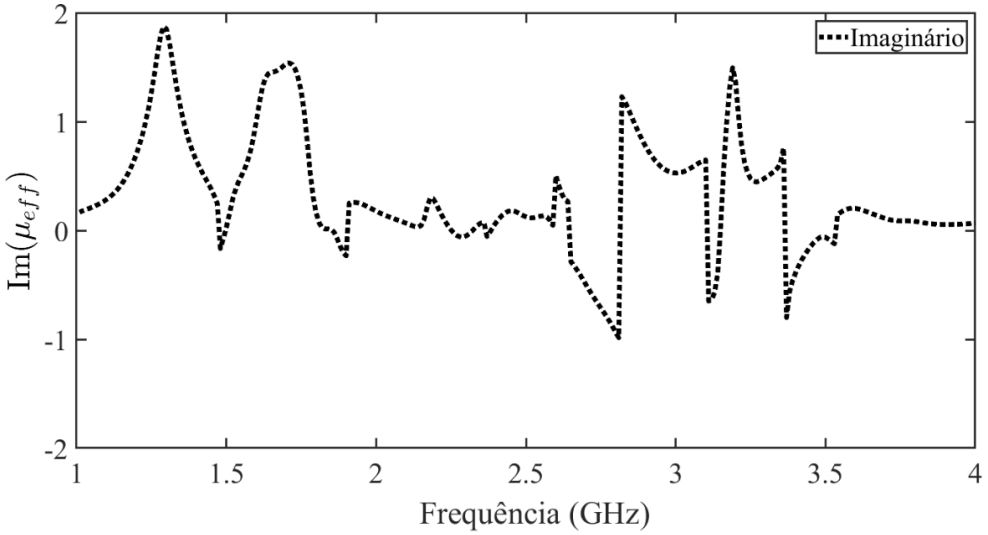
(b)

Fonte: Autoria própria.

Figura 72 - Parte real (a) e imaginária (b) da permeabilidade magnética efetiva do absorvedor proposto.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 2 resume os valores da parte real e da parte imaginária dos parâmetros efetivos extraídos do absorvedor proposto nas frequências de 1,66 GHz, 2,43 GHz e 3,53 GHz.

Tabela 2 - Parâmetros eletromagnéticos constitutivos recuperados do absorvedor proposto.

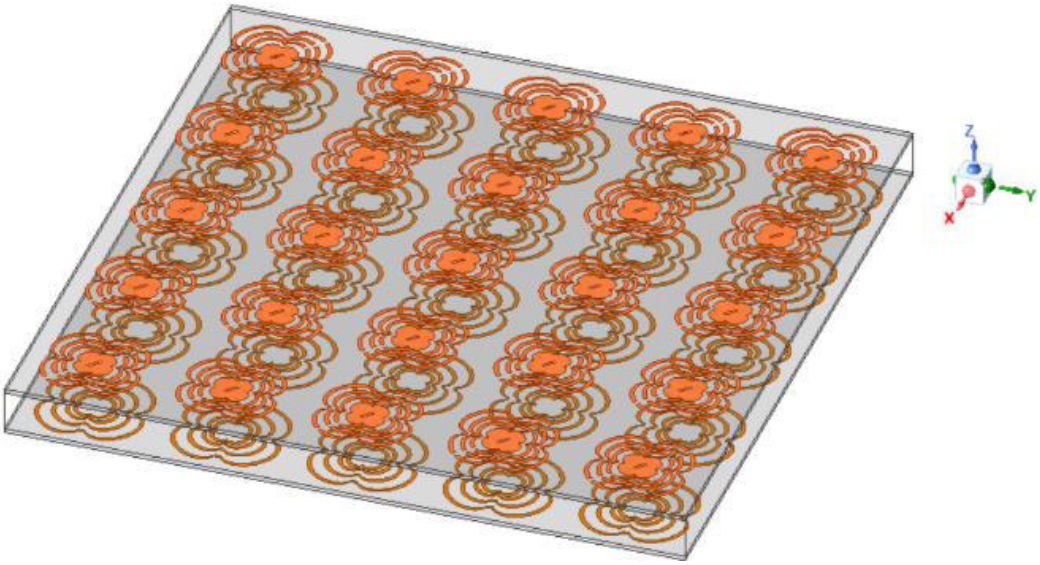
Frequência (GHz)	**Parte Real**			**Parte Imaginária**		
	ε_{eff}	μ_{eff}	Z_{eff}	ε_{eff}	μ_{eff}	Z_{eff}
1,66	0,1582	0,0785	1,045	1,327	1,459	0,0338
2,43	-0,6985	-1,036	1,136	0,37	0,1602	0,1913
3,56	0,1764	0,0217	0,7867	0,2060	0,1821	0,2384

Fonte: Autoria própria.

4.4 Etapas da Fabricação dos Protótipos

Os protótipos foram fabricados utilizando a técnica de circuito impresso. Após a análise numérica, o projeto foi ajustado com a duplicação da célula unitária e a aplicação do comando de união para criar a estrutura periódica, como visto na Figura 73. Os arquivos no formato *'dxf'* foram então exportados e processados no *software* Silhouette Studio, utilizado na máquina Silhouette, onde foi realizado o corte do adesivo de vinil.

Figura 73 - Etapa de exportação do '*dxf*' do projeto para o corte do adesivo.



Fonte: Autoria própria.

Após o corte, o adesivo é cuidadosamente colado no substrato de FR-4, previamente cortado e limpo. Com o auxílio de um bisturi e uma pinça, são removidas as partes do adesivo que não são necessárias, garantindo que a geometria resultante corresponda exatamente ao arquivo exportado do HFSS. Esse processo de retirada do adesivo pode ser visto na Figura 74.

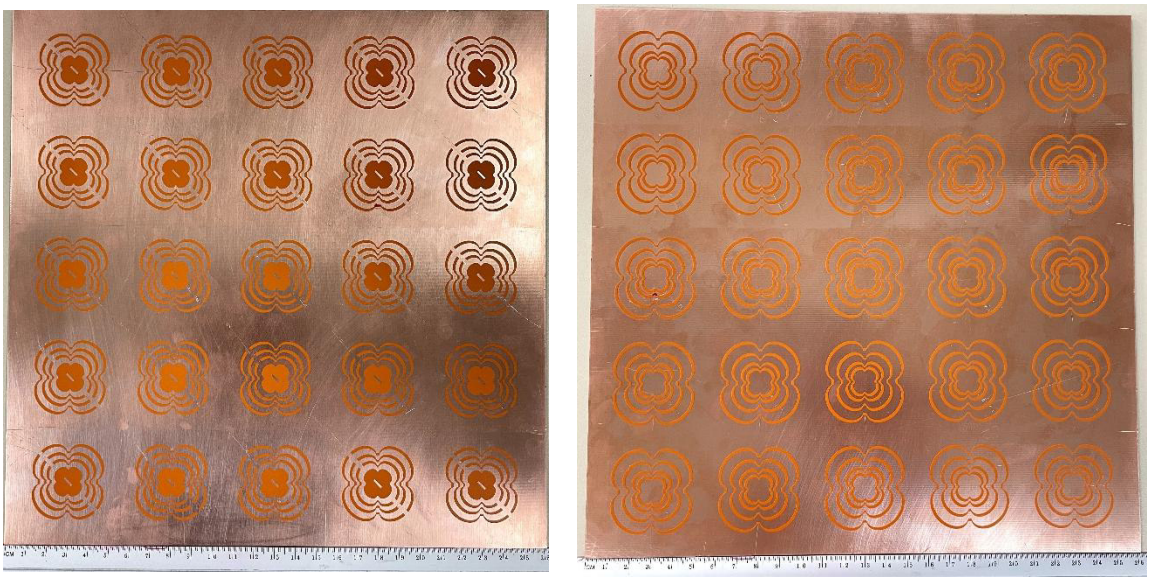
Figura 74 - Processo de retirar as partes desnecessárias do adesivo com pinça e bisturir.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 75 ilustra a estrutura final do absorvedor após o processo de retirada do adesivo. Em seguida, as placas de FR-4 são imersas em uma solução de percloreto de ferro para realizar o processo de corrosão. Após a corrosão, as placas são lavadas com água, secas e

montadas para a etapa experimental em laboratório, onde são realizadas as medições em espaço livre.

Figura 75 - Protóptipos antes da corrosão no percloreto de ferro.



Fonte: Autoria própria.

No capítulo 5, são apresentados os resultados experimentais da FSS inspirada na forma de *Oxalis tetraphylla* e do absorvedor proposto, que utiliza uma metassuperfície na camada superior e substitui o plano de terra por uma FSS com a mesma geometria.

4.5 Considerações Parciais

Este capítulo abordou a metodologia de pesquisa, que foi estruturada em cinco etapas. Este capítulo, focou na terceira etapa, que consistiu no projeto e nas análises numéricas realizadas no HFSS para a FSS e para o absorvedor proposto, ambos inspirados na forma de *Oxalis tetraphylla*. Além disso, foram detalhados o processo de extração dos parâmetros efetivos da estrutura multicamada simulada e as etapas executadas para a fabricação dos protótipos.

CAPÍTULO 5

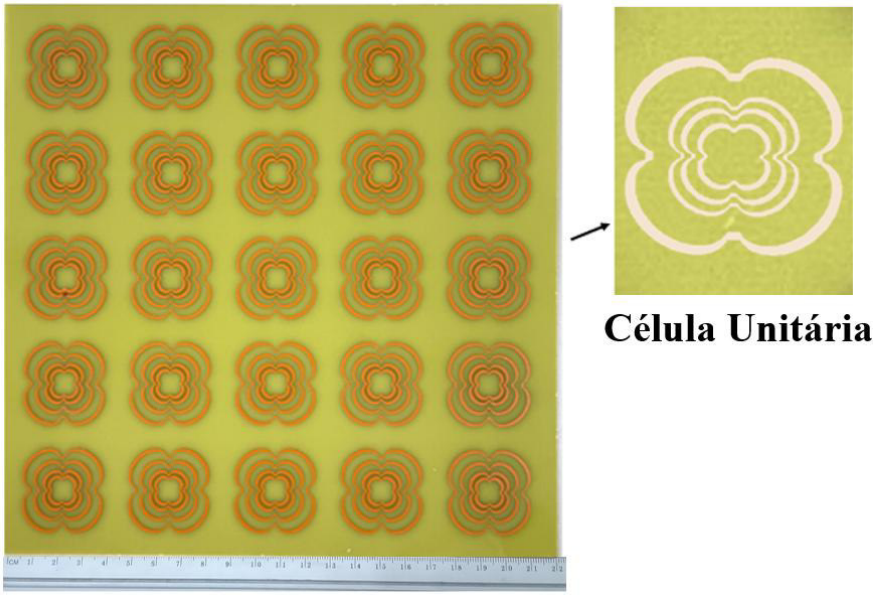
5 VALIDAÇÃO DAS ANÁLISES NUMÉRICAS E EXPERIMENTAIS

Esta etapa corresponde à fase 4 da metodologia apresentada na Figura 51. Trata-se da etapa experimental realizada em laboratório em espaço livre, com o objetivo de validar os resultados obtidos nas análises numéricas discutidas no Capítulo 4 desta tese.

5.1 Caracterização Experimental da FSS Inspirada na Forma de *Oxalis Tetraphylla*

Para validar as características da geometria proposta inspirada na forma de *Oxalis tetraphylla*, a FSS foi projetada, fabricada e caracterizada. A FSS foi fabricada em um substrato dielétrico FR-4 de baixo custo (ε_r = 4,4, altura de 1,6 mm e tangente de perda de 0,02), com o protótipo fabricado usando técnicas de placa de circuito impresso (PCI). A FSS fabricada co em uma matriz de 5 × 5 de células unitárias, resultando em um tamanho total de 220 mm × 220 mm, conforme mostrado na Figura 76.

Figura 76 - Protótipo da FSS inspirado na forma de *Oxalis tetraphylla*.

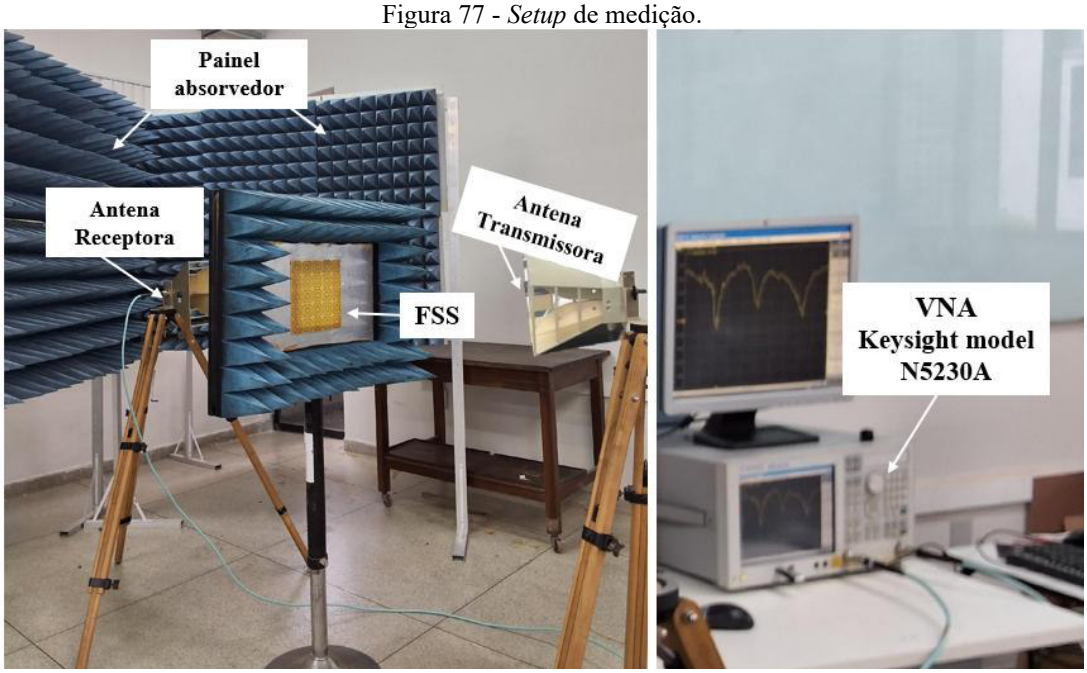


Fonte: Autoria própria.

Os resultados medidos foram obtidos na faixa de frequência de 1 GHz a 4 GHz no laboratório de medições de micro-ondas GTEMA/IFPB. Um analisador vetorial de rede de duas portas (modelo Keysight N5230A, faixa de 300 kHz a 13,5 GHz) e antenas corneta de banda

ultralarga (A.H. Systems modelo SAS-571, operando de 700 MHz a 18 GHz) foram usados para as medições. Além disso, uma configuração de medição com um painel de absorvedores de RF e uma folha condutora foi empregada para minimizar o ruído causado pela difração das bordas da FSS, como pode ser visto na Figura 77. A incidência da onda foi considerada normal à FSS.

Figura 77 - *Setup* de medição.



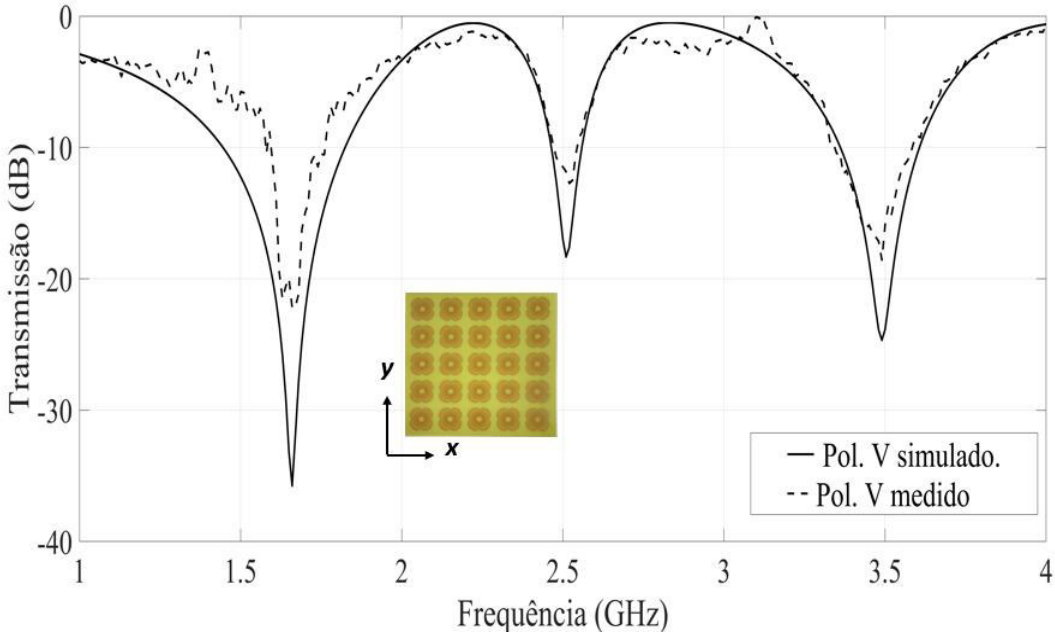
Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, foi realizada uma medição sem a presença da FSS, a fim de obter os valores de referência para o coeficiente de transmissão. As medições foram conduzidas para as polarizações horizontal e vertical. No entanto, como a geometria demonstrou ser independente da polarização, os resultados experimentais apresentados correspondem apenas à polarização vertical.

Na Figura 78 pode ser vista a resposta em frequência da FSS. Os resultados experimentais indicam o seguinte: a primeira ressonância ocorreu em 1,62 GHz com um coeficiente de transmissão de -18,93 dB e uma banda de rejeição de -10 dB abrangendo de 1,53 GHz a 1,70 GHz. A segunda ressonância foi observada em 2,47 GHz com um coeficiente de transmissão de -12 dB e uma banda de rejeição de -10 dB variando de 2,43 GHz a 2,5 GHz. A terceira ressonância ocorreu em 3,43 GHz, com coeficiente de transmissão de -16 dB e banda de rejeição de -10 dB entre 3,31 GHz e 3,53 GHz. As razões de frequência (f_R) para os resultados experimentais foram de 1,51 entre segunda e a primeira ressonâncias e 1,41 entre a

segunda e a terceira ressonâncias. Essas proporções confirmam que as bandas de frequência estão bem espaçadas, com $f_R < 2$, indicando uma estrutura de banda de frequência consistente.

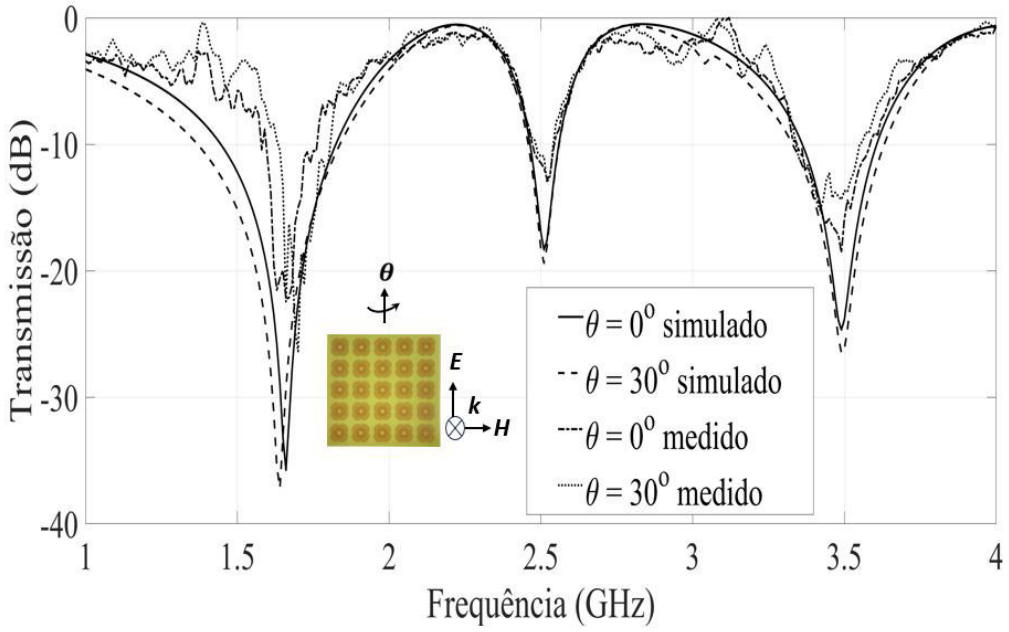
Figura 78 - Resposta em frequência, Transmissão (dB) × Frequência (GHz), FSS, V. pol, simulado e medido.



Fonte: Autoria própria.

Foram realizadas medições na estrutura em diferentes ângulos de incidência de ondas para avaliar a influência da variação angular nas respostas em frequência da FSS e avaliar sua estabilidade angular. A Figura 79 apresenta os resultados tanto para a incidência normal quanto para um ângulo oblíquo de 30°. Os resultados demonstram que a FSS mantém a estabilidade angular até um ângulo de incidência de 30°.

Figura 79 - Resposta em frequência, Transmissão (dB) × Frequência (GHz), FSS, V. pol, resultados simulados e medidos, para θ = 0 ° e θ = 30 °.



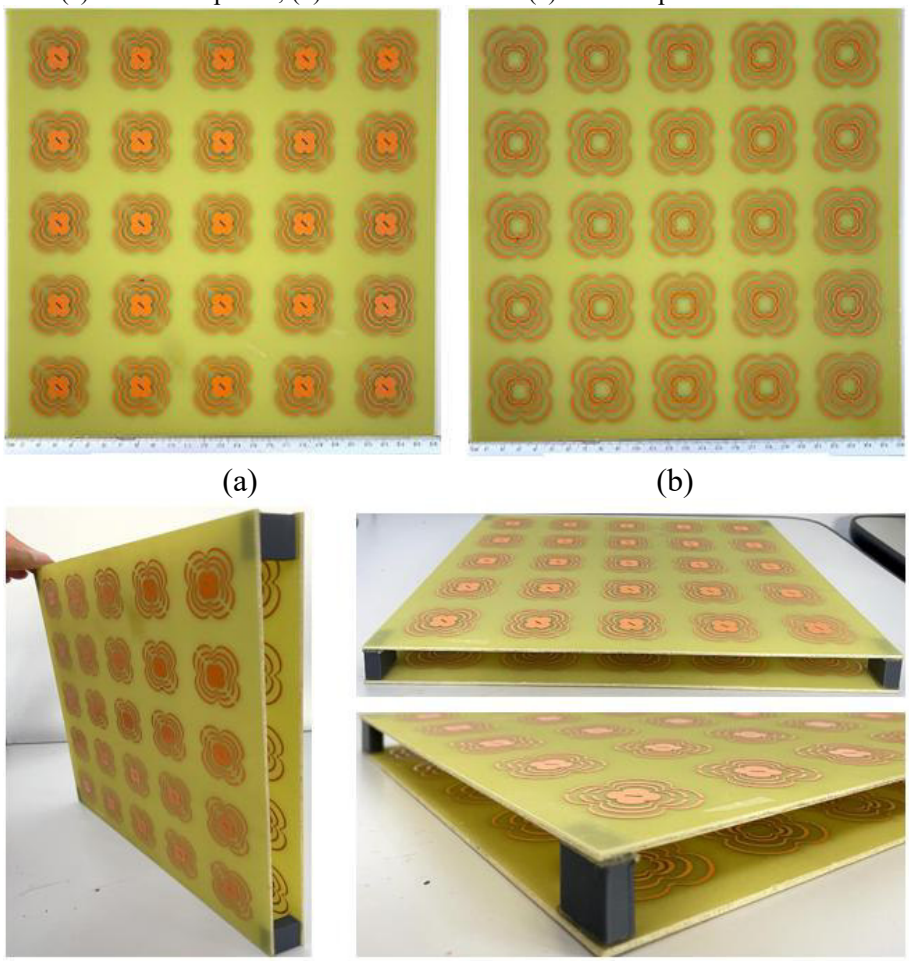
Fonte: Autoria própria.

5.2 Caracterização Experimental da Metassuperfície e FSS como Plano de Terra

Para verificar as características de absorção/transmissão do absorvedor proposto, a estrutura foi fabricada utilizando a técnica de circuito impresso. O projeto foi fabricado em um substrato dielétrico FR-4 de baixo custo (ε_r = 4,4, espessura de 1,6 mm e tangente de perda de 0,02) e quatro espaçadores de 15 mm fabricados com uma impressora 3D. A estrutura consiste em 5 × 5 células unitárias, resultando em um tamanho total de 260 mm × 260 mm, conforme ilustrado na Figura 80.

Os resultados medidos foram obtidos para a faixa de frequência de 1 GHz a 4 GHz no laboratório de medições de micro-ondas GTEMA/IFPB, usando um analisador de rede vetorial de duas portas (modelo Keysight N5230A, com faixa de frequência de 300 kHz a 13,5 GHz) e um par de antenas corneta de banda ultralarga (A.H. Systems modelo SAS-571, de 700 MHz a 18 GHz).

Figura 80 - Absorvedor do tipo absorve/transmite proposto:
(a) Camada superior, (b) Camada inferior e (c) Vista de perfil da estrutura.



(a) (b)

(c)

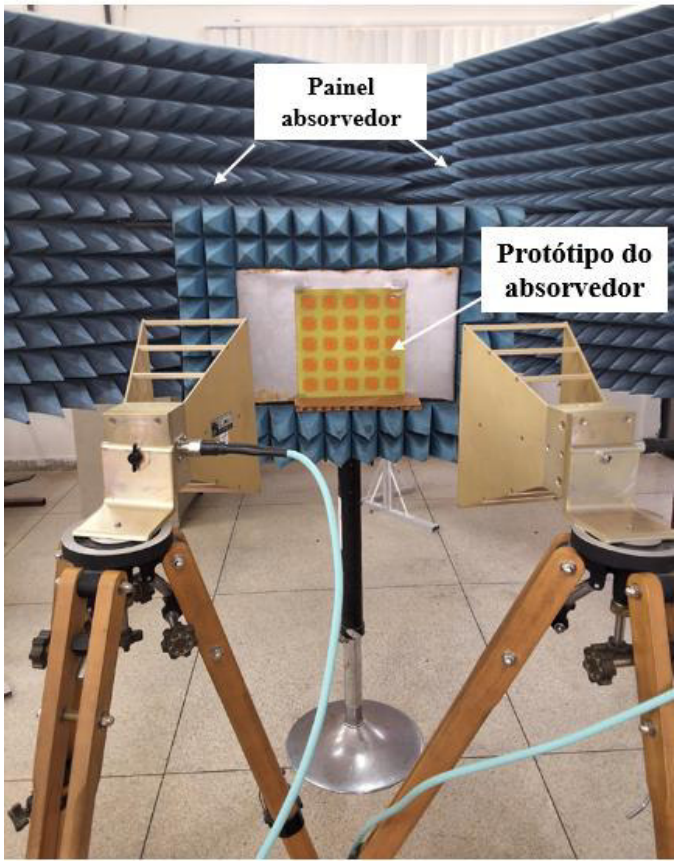
Fonte: Autoria própria.

Nesta etapa, foram realizadas as medições dos coeficientes de transmissão e reflexão do protótipo. A configuração utilizada para a medição do coeficiente de transmissão seguiu o mesmo arranjo apresentado na Figura 77. Inicialmente, a medição foi feita sem o absorvedor posicionado na janela de medição, com o objetivo de obter os valores de referência para os coeficientes de transmissão T_{xx} e T_{yx}.

Para a obtenção dos coeficientes de reflexão R_{xx} e R_{yx} , ambas as antenas foram posicionadas no mesmo lado do protótipo (Figura 81). Utilizou-se uma placa de cobre como referência para as medições, permitindo a comparação entre a reflexão ideal e a real. A reflexão efetiva do absorvedor foi determinada pela subtração entre os sinais refletidos com e sem o protótipo. Embora, nesse arranjo, o parâmetro adquirido pelo analisador vetorial de redes seja o S_{21} (normalmente associado à transmissão), o fato de as antenas transmissora e receptora estarem posicionadas na mesma face da amostra implica que o sinal medido corresponde à

parcela refletida pela estrutura. Assim, o valor obtido de S_{21} neste contexto representa, na prática, a resposta refletida (coeficiente de reflexão) no plano de medição. Vale destacar, entretanto, que essa configuração impõe uma limitação importante: ela dificulta a realização de testes com variação do ângulo de incidência, restringindo a análise à incidência normal.

Figura 81 - *Setup* de medição para o coeficiente de reflexão.



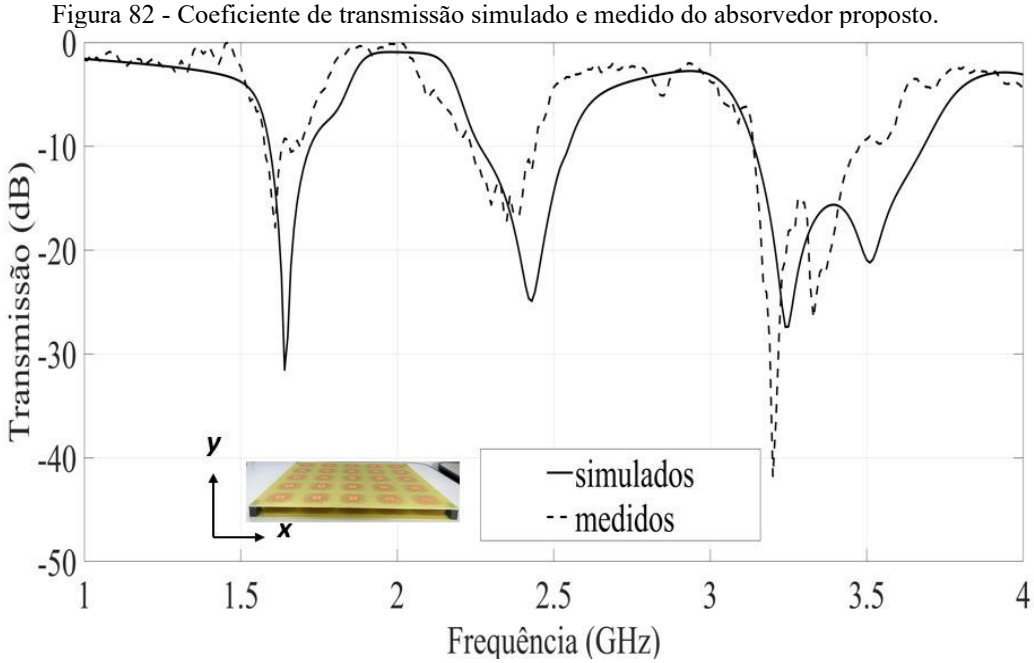
Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, foram realizadas medições do coeficiente de transmissão do absorvedor proposto com o objetivo de validar o projeto e verificar a correspondência entre os resultados experimentais e as simulações. As medições foram conduzidas para as polarizações horizontal e vertical. No entanto, como a estrutura demonstrou independência em relação à polarização, apenas os resultados obtidos para a polarização vertical foram apresentados

Na Figura 82 pode ser vista a comparação entre os resultados do coeficiente de transmissão simulado e medido. Nota-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais obtidos nas faixas de frequência de 1,6 GHz, 2,45 GHz e 3,5 GHz, com ambos apresentando valores consistentemente abaixo do limite de referência de -10 dB. Isso confirma

que a estrutura funciona conforme o esperado em termos de coeficiente de transmissão nas frequências desejadas.

Figura 82 - Coeficiente de transmissão simulado e medido do absorvedor proposto.

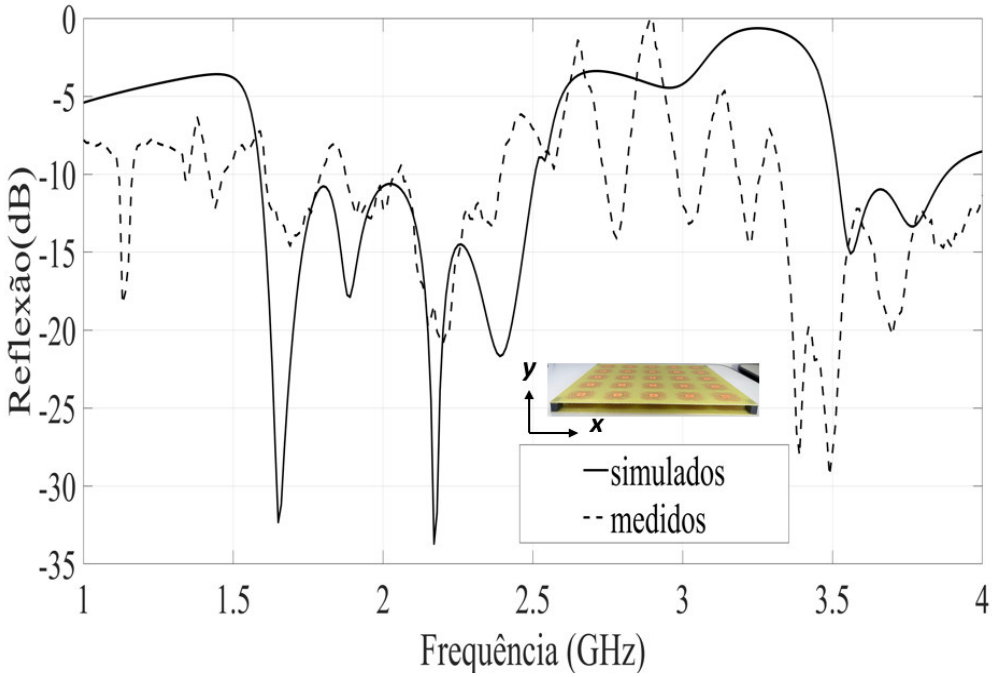


Fonte: Autoria própria.

A segunda etapa consistiu na medição do coeficiente de reflexão da estrutura proposta. A Figura 83 apresenta a comparação entre os resultados simulados e experimentais, revelando uma boa concordância nas faixas de frequência de 1,6 GHz, 2,45 GHz e 3,5 GHz com valores abaixo do limite de referência de -10 dB. Esses resultados confirmam que o absorvedor atendeu ao desempenho esperado em termos de resposta de coeficiente de reflexão.

Observa-se, no entanto, o surgimento de uma frequência abaixo de -15 dB no início da faixa de análise, possivelmente associada a limitações do sistema de medição. Ressalta-se que o próprio *setup* experimental impõe restrições para as medições do coeficiente de reflexão. Sugere-se, para medições futuras realizar três medições com pequenos deslocamentos do absorvedor em relação à antena (variando a distância em alguns centímetros). Essa abordagem pode ajudar a mitigar efeitos de cancelamento de fase e melhorar os resultados para o coeficiente de reflexão.

Figura 83 - Coeficiente de reflexão simulado e medido do absorvedor proposto.



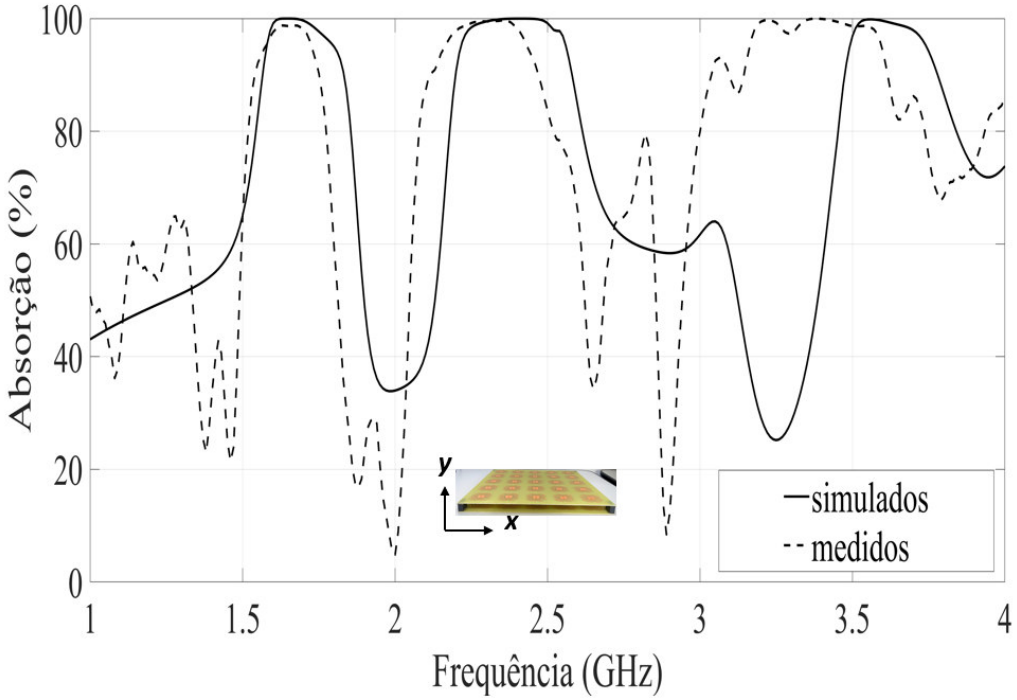
Fonte: Autoria própria.

O coeficiente de transmissão e o coeficiente de reflexão medidos foram usados para calcular os picos de absorção da estrutura proposta, conforme descrito na Equação (17). A comparação entre os valores de absorção simulados e medidos pode ser vistos na Figura 84.

Experimentalmente, os valores de absorção foram de aproximadamente 98,66%, 99,67% e 98,62% nas frequências de 1,65 GHz, 2,4 GHz e 3,51 GHz, respectivamente. As razões de frequência (f_R) entre as ressonâncias foram de 1,45 entre a a segunda e a primeira ressonâncias e 1,46 entre a segunda e a terceira. Esses resultados confirmam que as bandas de frequência são minimamente próximas, com $f_R < 2$.

O deslocamento observado entre o pico de absorção na frequência de 3,51 GHz, nos resultados medidos e simulados, pode ser atribuído ao processo de fabricação do protótipo, realizado manualmente por meio da técnica de circuito impresso com adesivo. Irregularidades como pequenas deformações ou cortes imprecisos no adesivo durante a montagem podem ter contribuído para essa diferença.

Figura 84 - Absorção simulada e medida do absorvedor proposto.

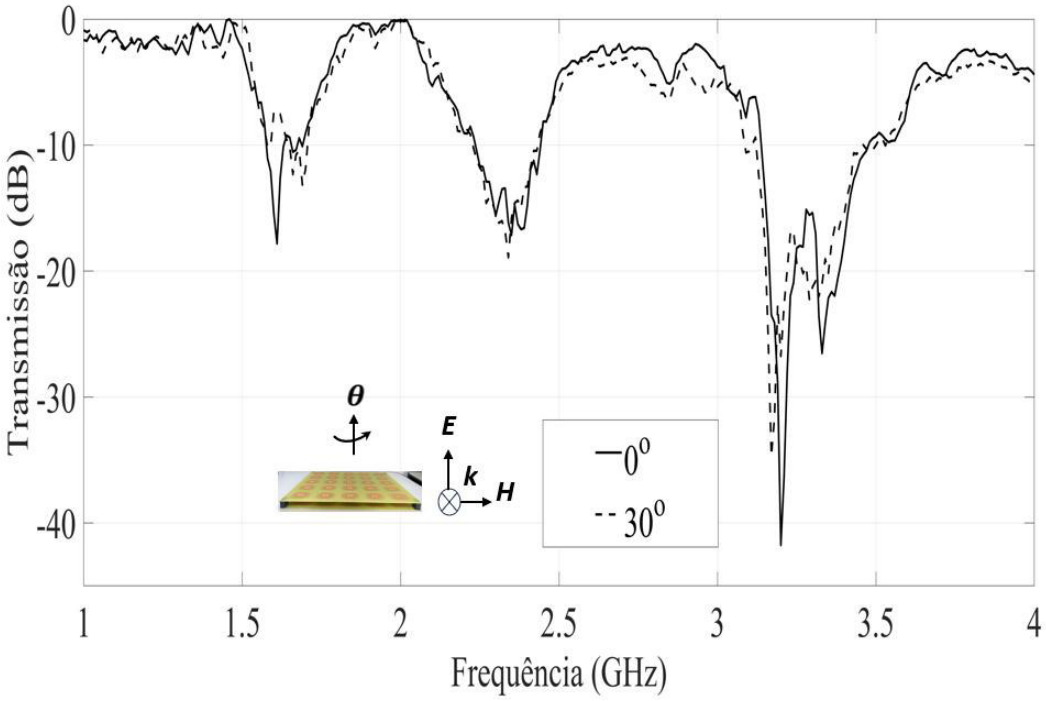


Fonte: Autoria própria.

Foram realizadas medições da estrutura sob ângulos de incidência normal e oblíquo das ondas, com o objetivo de avaliar o impacto da variação angular nas respostas em frequência do coeficiente de transmissão, do coeficiente de reflexão e absorção, permitindo assim a análise da estabilidade angular do absorvedor proposto.

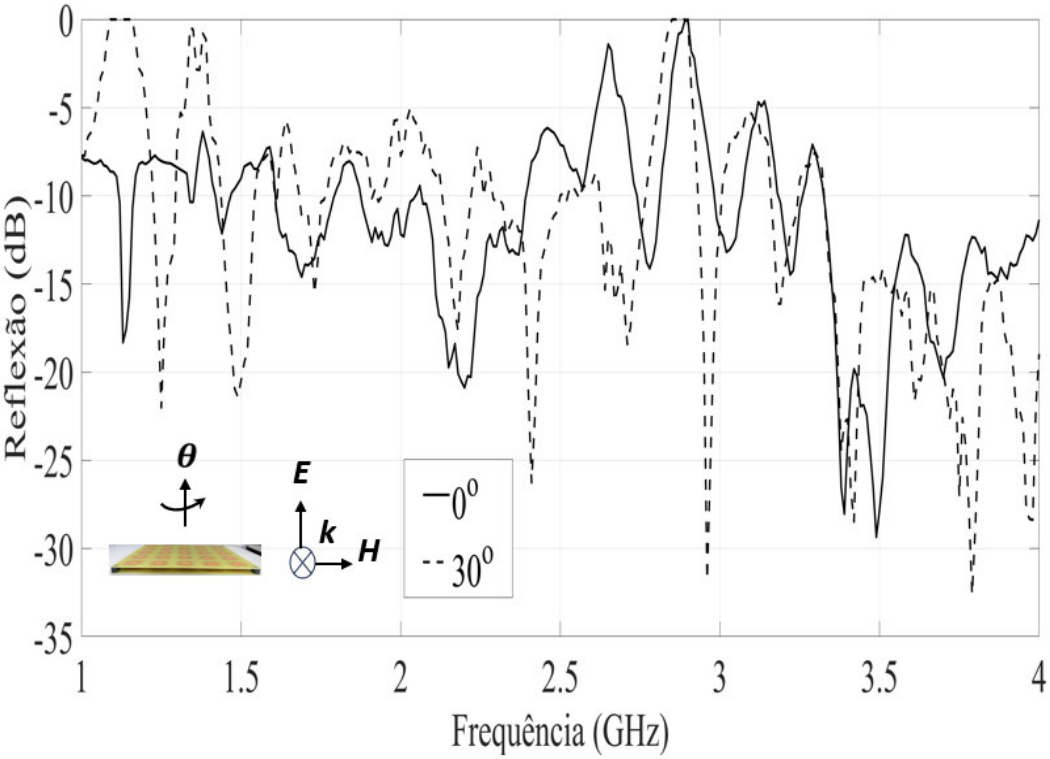
As Figuras 85, 86 e 87 ilustram os resultados para a incidência normal e um ângulo oblíquo de 30° para o coeficiente de transmissão, coeficiente de reflexão e a taxa de absorção, respectivamente. Os resultados alcançados indicam que a estrutura mantém estabilidade angular para ângulos de incidência de até 30°.

Figura 85 - Coeficiente de transmissão medido do absorvedor proposto para θ = 0° e θ = 30°.



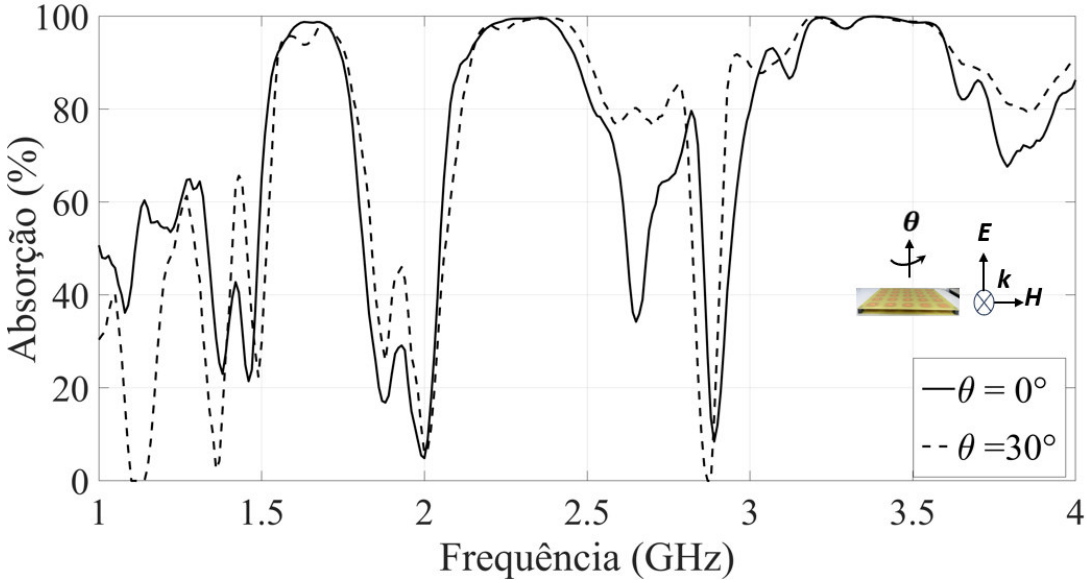
Fonte: Autoria própria.

Figura 86 - Coeficiente de reflexão medido do absorvedor proposto para θ = 0° e θ = 30°.



Fonte: Autoria própria.

Figura 87 - Absorção medida do absorvedor proposto para θ = 0° e θ = 30°.



Fonte: Autoria própria.

A estrutura apresentada é adequada para aplicações nas bandas S e C. Na banda S, particularmente em 1,66 GHz, é usado em comunicações por satélite, incluindo transmissão de dados, transmissão de TV, comunicação de voz e sistemas de navegação como GPS. Também é empregada em comunicações militares, como sistemas de radar e *links* entre unidades terrestres, aéreas e marítimas. Na banda C, a estrutura é aplicável em várias tecnologias, incluindo redes Wi-Fi (2,4 GHz) e 5G (3,5 GHz).

5.3 Considerações Parciais

Neste capítulo, foram apresentadas as etapas experimentais realizadas em laboratório, com o objetivo de validar os resultados obtidos nas análises numéricas do absorvedor do tipo absorve/transmite, baseado em metassuperfícies de meio efetivo e da FSS em substituição ao plano de terra. Foram realizadas medições em espaço livre do coeficiente de reflexão e do coeficiente de transmissão, além de uma avaliação da estabilidade angular da estrutura. A partir do coeficiente de reflexão e do coeficiente de transmissão, foi calculada a taxa de absorção da estrutura, que alcançou picos máximos superiores a 90% nas faixas de frequência de 1,65 GHz, 2,4 GHz e 3,51 GHz.

CAPÍTULO 6

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de tese propôs um absorvedor com características de absorção/transmissão, baseado em uma metassuperfície e em uma Superfície Seletivas em Frequência utilizada como plano de terra. A geometria adotada foi inspirada na *Oxalis tetraphylla*. O projeto e a análise numérica da estrutura foram discutidos em detalhes, com ênfase em sua resposta em frequência, independência de polarização e estabilidade angular, apresentando desempenho estável para ângulos de incidência de até 30°.

Para embasar a proposta desta pesquisa, foi realizado um levantamento sobre Superfícies Seletivas em Frequência e metassuperfícies, com ênfase em suas aplicações em estruturas absorvedoras. Essa revisão permitiu identificar os principais avanços tecnológicos e as lacunas ainda existentes na literatura, evidenciando a importância de abordagens inovadoras para o controle da absorção e transmissão de ondas eletromagnéticas.

Nesse contexto, foram investigadas as características fundamentais dessas estruturas, incluindo a resposta em frequência, a independência de polarização, o comportamento sob diferentes ângulos de incidência e o uso de geometrias com propriedades metamateriais e as geometrias bioinspiradas. Também foram analisadas as particularidades dos absorvedores baseados em meio efetivo, com especial atenção aos dispositivos projetados para operar em múltiplas bandas de frequência.

O levantamento do estado da arte concentrou-se na análise de absorvedores com resposta multibanda, diferentes configurações geométricas, estabilidade angular, independência de polarização e aplicações. Nesse contexto, foram identificadas diversas geometrias eficientes, como anéis assimétricos, estruturas em anel e ressonadores modificados entre outras, com desempenho eficaz nas bandas S, C, X, Ku e K. Essas estruturas demonstraram alta capacidade de absorção seletiva, cobrindo múltiplas faixas de frequência em um único dispositivo.

Verificou-se ainda que a incorporação de metassuperfícies tem se mostrado uma estratégia eficaz para ampliar a faixa de operação dos absorvedores e proporcionar maior controle sobre o comportamento eletromagnético das estruturas. Diversas abordagens também buscaram garantir estabilidade de desempenho sob diferentes ângulos de incidência e polarizações, característica essencial para aplicações práticas, especialmente em cenários que exigem robustez e confiabilidade.

Entre as principais aplicações encontradas, destacam-se os sistemas de comunicação sem fio sub-6 GHz, redes Wi-Fi e 5G, transmissões via satélite, além de soluções voltadas à mitigação da interferência eletromagnética (EMI) e à garantia da compatibilidade eletromagnética (EMC). Nesses contextos, os absorvedores desempenham um papel fundamental na redução de reflexões e interferências que comprometem a qualidade dos sinais transmitidos.

Por fim, identificou-se que a maioria dos trabalhos analisados utiliza plano de terra metálico completo, o que acarreta limitações importantes, como a geração de reflexões indesejadas e o aumento da interferência por multipercursos. Como alternativa a essa abordagem, esta tese propôs a substituição do plano de terra por uma FSS do tipo *patch*, permitindo uma resposta seletiva de absorção/transmissão, melhor adaptação de impedância, redução de interferências e maior simplicidade de fabricação — dispensando o uso de camadas resistivas ou materiais condutivos complexos e de alto custo.

Dessa maneira, um protótipo do absorvedor foi fabricado e análises experimentais foram conduzidas em espaço livre. O coeficiente de reflexão e o coeficiente de transmissão foram medidos e ficaram abaixo da referência de -10 dB em 1,65 GHz, 2,4 GHz e 3,51 GHz, confirmando que o absorvedor absorve efetivamente bandas de frequência específicas, permitindo a transmissão fora dessas bandas.

O absorvedor proposto alcançou taxas de absorção máxima de 98,66%, 99,67% e 98,62% para 1,65 GHz, 2,4 GHz e 3,51 GHz, respectivamente. Além disso, foi observada uma razão de frequência de 1,45 entre segunda e a primeira frequências de absorção e 1,46 entre a terceira e a segunda, indicando frequências de ressonância espaçadas. Este é considerado um excelente resultado, pois a razão de frequência está abaixo do limite ideal de dois, o que é particularmente vantajoso para absorvedores inspirados em estruturas naturais. Até o momento, nenhum desenho semelhante foi relatado na literatura.

A estrutura proposta opera nas bandas S e C. Na banda S (por exemplo, 1,65 GHz), atende aplicações em comunicações via satélite, GPS e sistemas militares, enquanto na banda C, é usado para redes Wi-Fi (2,4 GHz) e 5G (3,51 GHz).

6.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Como perspectivas para trabalhos futuros, propõe-se a ampliação das investigações sobre a evolução das estruturas desenvolvidas, com foco na exploração de novas abordagens e tecnologias que aprimorem o desempenho e expandam as possibilidades de aplicação. Dessa forma, sugere-se:

- **Desenvolvimento de absorvedores para aplicações espaciais:** investigar o uso da geometria bioinspirada e da estrutura de meio efetivo em absorvedores projetados especificamente para satélites, otimizando desempenho em condições de temperatura, pressão e radiação, considerando ainda requisitos de peso reduzido e alta eficiência.

- **Integração de estruturas ativas:** explorar a inclusão de diodos PIN no absorvedor para criar estruturas reconfiguráveis, permitindo controle dinâmico das faixas de absorção e transmissão. Além disso, investigar outras geometrias inspiradas na natureza para miniaturizar as células unitárias, visando alcançar frequências de absorção mais próximas e maior compactação do dispositivo.

- **Expansão para outras bandas de frequência:** adaptar a geometria bioinspirada para operar em faixas de frequência além das especificadas (1,6 GHz, 2,5 GHz e 3,5 GHz), abrangendo aplicações emergentes em comunicação de radares automotivos e dispositivos IoT.

- **Aplicação em sensores:** investigar o uso da estrutura para sensores baseados em variação de absorção/transmissão, especialmente em áreas como monitoramento ambiental, detecção de gases ou aplicações biomédicas, onde alta sensibilidade é requerida.

- **Exploração de técnicas de fabricação inovadoras:** implementar métodos de fabricação avançados, como impressão 3D ou litografia de alta precisão, para viabilizar a produção em larga escala e reduzir custos, garantindo maior acessibilidade e versatilidade das estruturas.

- **Simulação e validação experimental avançada:** realizar testes aprofundados em câmaras anecoicas e ambientes reais, validando o desempenho da estrutura em condições práticas e ajustando os modelos para atender aplicações específicas.

- **Uso de materiais flexíveis e transparentes**: investigar a aplicação de materiais flexíveis, como filmes poliméricos ou substratos transparentes, na construção de absorvedores baseados em FSS. Essa abordagem permitiria o desenvolvimento de dispositivos leves e conformáveis, ideais para integração em superfícies curvas, como fuselagens de aeronaves ou veículos, e para aplicações onde a transparência óptica é essencial, como janelas inteligentes ou painéis solares.

- **Incorporação de materiais resistivos:** investigar a aplicação de materiais resistivos na estrutura do absorvedor proposto, com o objetivo de aprimorar o controle da largura de banda e a eficiência de absorção. A introdução de filmes resistivos finos ou camadas dissipativas pode permitir a atenuação controlada das ondas eletromagnéticas, tornando o absorvedor mais eficaz em faixas de frequência amplas e variáveis. Essa abordagem é especialmente promissora para aplicações em dispositivos de camuflagem eletromagnética, proteção contra interferência eletromagnética e integração em ambientes com requisitos dinâmicos de absorção.

6.2 Trabalhos Publicados Durante o Doutorado

Este tópico apresenta as publicações realizadas e/ou submetidas durante o doutorado como primeira autora, bem como os trabalhos desenvolvidos em colaboração com outros alunos do laboratório de Radiometria UFCG. Além disso, são destacadas as premiações recebidas em congressos ao longo do período.

- **Trabalho Subemetido a Revista IEEE ACEESS**

1. SOUZA, J. da S. GOMES NETO, A; CAMPOS, A. L. P. S.; SERRES, A. J. R. Bioinspired Frequency Selective Rasorber with Closely Spaced Bands. **IEEE ACESS** (SUBMETIDO – EM AVALIAÇÃO).

- **Trabalho Publicados em Conferências Nacionais e Internacionais**

2. SOUZA, J. da S. CAMPOS, A. L. P. S.; SERRES, A. J. R. Design and Analysis of a Frequency-Selective Surface Inspired by the *Oxalis tetraphylla* for Applications in Closely Resonant Bands. *In:* **IEEE AP-S Latin American Conference on Antennas and Propagation (LACAP)**. IEEE, 2024.

3. SOUZA, J. da S.; SERRES, A. J. R.; GOMES NETO, A. G; GENOVESI, S. Analysis of the angular stability of an FSS based on the geometry of open asymmetrical trapezoidal rings. *In:* **2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)**. IEEE, 2023.

4. SOUZA, J. da S.; SERRES, A. J. R.; GOMES NETO, A. G. A Novel FSS Absorber for 5 GHz WLAN Applications. *In:* **2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)**. IEEE, 2022. p. 1248-1249.

5. SOUZA, J. da S.; ARAÚJO, J. I. L; SERRES, A. J. R.; GOMES NETO, A. G. Revisão Sistemática da Literatura sobre Metodologias de Projetos de FSSs Absorvedoras. *In:* **20° Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO)**, 2022. p. 1-5.

6. SOUZA, J. da S.; SERRES, A. J. R.; GOMES NETO, A. G. Analysis of Angular Stability of FSS Based on Open Trapezoidal Rings Geometry. *In:* **2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)**. IEEE, 2021. p. 625-626.

6.2 Colaborações em Publicações no Grupo de Pesquisa de Radiometria-UFCG

1. ARAÚJO, J. I. L.; SOUZA, J. da S.; SERRES, G. K. de F.; GENOVESI, S. G., SANTOS, D. F. de S.; SERRES, A. J. R. Flexible UHF RFID Tag for On-Body Applications: Design and Performance Evaluation. *In*: **IEEE AP-S Latin American Conference on Antennas and Propagation (LACAP)**. IEEE, 2024.

2. CARNEIRO, P. K. P. de M.; SOUZA, J. da S.; GOMES NETO, A.; SERRES, G. K. de F.; HERBSTER, A. F.; SERRES, A. J. R. Vivaldi Antipodal Antenna with triangular slots fed by air-filled RSIW for UWB applications. *In:* **IEEE AP-S Latin American Conference on Antennas and Propagation (LACAP). IEEE, 2024.**

3. ARAÚJO, J. I. L; SOUZA, J. da S; SANTOS, D. F. de S; SERRES, A. J. R. Projeto de Circuito de Colheita de Energia RF para um Maior Alcance de Leitura em Etiquetas RFID UHF. *In:* **20° Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO),** 2022. p. 1-5.

4. ABRANTES, C.; SERRES, A. J. R.; SOUZA, J da S.; CAVALCANTI, A; SERRES, G. A Frequency Reconfigurable Filtenna for UWB and 5G Sub-6 GHz Band Applications. *In:* **2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC- URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)**. IEEE, 2023.

5. ARAÚJO, J. I. L; SOUZA, J. da S; SANTOS, D. F. de S; SERRES, A. J. R. Passive and Flexible UHF RFID Tag for Body-Worn Applications. *In:* **2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**, 2023.

6.3 Premiações

1. Melhor trabalho de estudante apresentado em sessão pôster. *In:* **20° Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO)**, Natal, Rio Grande do Norte, 2022.

2. 1º lugar em Concurso de Vídeo Multilíngue na LAMC-2023 R9 - Versão em português. *In:* **IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC-2023)**, San Jose, Costa Rica, 2023.

REFERÊNCIAS

AFSAR, Md S. U. *et al*. A new octagonal close ring resonator-based dumbbell-shaped tuning fork perfect metamaterial absorber for C-and Ku-band applications. **Micromachines**, v. 13, n. 2, p. 162, 2022.

AL-JOUMAYLY, M. A.; BEHDAD, N. Low-profile, highly-selective, dual-band frequency selective surfaces with closely spaced bands of operation. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 58, n. 12, p. 4042-4050, 2010.

ANWAR, R. S.; MAO, L.; NING, H. Frequency selective surfaces: a review. **Applied Sciences**, v. 8, n. 9, p. 1689, 2018.

ALBOOYEH, M.; SIMOVSKI, C.; TRETYAKOV, S. Homogenization and characterization of metasurfaces: General framework. *In:* **2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)**. IEEE, 2016. p. 1-3.

AOBO; L.; SINGH, S.; SIEVENPIPER, D. Metasurfaces and their applications. **Nanophotonics**, v. 7, n. 6, p. 989-1011, 2018.

AREIAS, T. C *et al.* Frequency Selective Surface Microwave Absorber for WLAN Applications. **Journal of Communication and Information Systems**, v. 35, n. 1, p. 208, 2020.

AZEMI, S. N; GHORBANI, K; W. ROWE, S. T. Mechanically tunable and reconfigurable FSS using spring loaded ring resonators. *In*: **Microwave Conference (EuMC), 2013 European, Nuremberg**, p. 932-935, 2013.

BAENA, Juan D. *et al*. Artificial magnetic metamaterial design by using spiral resonators. **Physical review B**, v. 69, n. 1, p. 014402, 2004.

BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. John Wiley & Sons, 2015.

BAKSHI, S. C.; MITRA, D.; GHOSH, S. A frequency selective surface based reconfigurable rasorber with switchable transmission/reflection band. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 18, n. 1, p. 29-33, 2018.

BAJAJ, P.; KUNDU, D.; SINGH, D. Frequency Selective Surface-Based Electromagnetic Absorbers: Trends and perspectives. **Wireless Personal Communications**, v. 131, n. 3, p. 1881-1912, 2023.

BHATTARAI, K. *et al*. Metamaterial perfect absorber analyzed by a meta-cavity model consisting of multilayer metasurfaces. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 10569, 2017.

BENNAOUM, M. *et al.* Investigation of a near-perfect quad-band polarization-insensitive metamaterial absorber based on dual-T circular shaped resonator array designed on a silicon substrate for C-, X-and Ku-bands applications. **Silicon**, v. 15, n. 2, p. 699-712, 2023.

BERNARDES, D. de J. P. *et al.* Microstrip Patch Antenna Bioinspired in Primrose Flower for WLAN and Bluetooth Applications. In: **2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)**. IEEE, 2021. p. 1-4.

BHATTACHARYYA, S.; VAIBHAV SRIVASTAVA, K. Triple band polarization independent ultra-thin metamaterial absorber using electric field-driven LC resonator. **Journal of Applied Physics**, v. 115, n. 6, 2014a.

BHATTACHARYYA, S. *et al.* Study on ultra-thin dual frequency metamaterial absorber with retrieval of electromagnetic parameters. *In:* **2014 Twentieth National Conference on Communications (NCC)**. IEEE, 2014b. p. 1-6.

BUKHARI, S. S.; VARDAXOGLOU, J.; WHITTOW, W. A metasurfaces review: Definitions and applications. **Applied Sciences**, v. 9, n. 13, p. 2727, 2019.

CAMPOS, A. L. P. S. **Superfícies Seletivas em Frequência – análise e projeto**, Natal: IFRN Editora, 2009. Disponível em: https://memoria.ifrn.edu.br/handle/1044/1030. Acesso em: 05 abr. 2023.

CHAMBERS, B. Optimum design of a Salisbury screen radar absorber. **Electronics Letters**, v. 30, n. 16, p. 1353-1354, 1994.

CHENG, Y. *et al.* A planar polarization-insensitive metamaterial absorber. **Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications**, v. 9, n. 1, p. 8-14, 2011.

CHEN, H-T; TAYLOR, A. J.; YU, N. A review of metasurfaces: physics and applications. **Reports on progress in physics**, v. 79, n. 7, p. 076401, 2016.

CHENG, Y.; LUO, H.; CHEN, F. Broadband metamaterial microwave absorber based on asymmetric sectional resonator structures. **Journal of Applied Physics**, v. 127, n. 21, p. 214902, 2020.

CHOI, I. *et al*. Optimum design method of a nano-composite radar absorbing structure considering dielectric properties in the X-band frequency range. **Composite Structures**, v. 119, p. 218-226, 2015.

COELHO, H. J. S. *et al.* Multiband Metasurface-Based Absorber for Applications in X, Ku, and K Bands. **Radio Science**, v. 58, n. 8, p. e2023RS007711, 2023.

COSTA, F.; MONORCHIO, A.; MANARA, G. Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces. **IEEE transactions on antennas and propagation**, v. 58, n. 5, p. 1551-1558, 2010.

CUI, T. J.; SMITH, D. R.; LIU, R. **Metamaterials**. Boston, MA, USA: Springer, 2010.

DENG, G. *et al.* An ultrathin, triple-band metamaterial absorber with wide-incident-angle stability for conformal applications at X and Ku frequency band. **Nanoscale Research Letters**, v. 15, p. 1-10, 2020.

DEY, S.; DEY, S. Conformal multifunction FSS with enhanced capacitance loading for high angle stable stopband filtering and microwave absorption. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 64, n. 2, p. 315-326, 2022.

DEWANI, A. A. *et al.* Miniaturised meandered square frequency selective surface on a thin flexible dielectric with selective transmission. **Flexible and Printed Electronics**, v. 1, n. 2, p. 025001, 2016.

DEWANI, A. A. *et al.* Window RF shielding film using printed FSS. **IEEE Transactions on antennas and propagation**, v. 66, n. 2, p. 790-796, 2018.

DINCER, F. *et al*. Polarization angle independent perfect metamaterial absorbers for solar cell applications in the microwave, infrared, and visible regime. **Progress In Electromagnetics Research**, v. 144, p. 93-101, 2014.

DU TOIT, L. J. The design of Jauman absorbers. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 36, n. 6, p. 17-25, 1994.

EDRIES, M. *et al.* A new compact quad-band metamaterial absorber using interlaced I/Square resonators: design, fabrication, and characterization. **IEEE Access**, v. 8, p. 143723-143733, 2020.

EVANGELISTA, T. da S. *et al.* A Reconfigurable Frequency Selective Surface for Wi-Fi Application. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 22, p. 33-46, 2023.

EVANGELISTA, T. da S.; GOMES NETO, A.; SERRES, A. J. R. Improved microstrip antenna with FSS superstrate for 5G NR applications. *In:* **2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)**. IEEE, 2021. p. 1-5.

FALCONE, F. *et al.* Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials. **Physical review letters**, v. 93, n. 19, p. 197401, 2004.

FANTE, R. L.; MCCORMACK, M.T. Reflection properties of the Salisbury screen. **IEEE transactions on antennas and propagation**, v. 36, n. 10, p. 1443-1454, 1988.

FANIAYEU, I.; ASADCHY, V.; FANYAEV, I. Polarization control with helical metasurfaces. Crystals, v. 10, n. 9, p. 726, 2020.

FREEPIK. **Forno de micro-ondas branco com placa de vidro vazio no interior, com abrir e fechar a porta**. 2024. Disponível em: https://br.freepik.com/vetores-gratis/forno-de-microondas-branco-com-placa-de-vidro-vazio-no-interior-com-abrir-e-fechar-a-porta_2238357.htm#query=forno%20microondas&position=1&from_view=keyword&track=ais&uuid=f62fc215-5a6c-4a94-9704-f2d7cd35f112. Acesso em: 11 fev 2024.

FOLGUERAS, L. de C.; REZENDE, M. C. Multilayer radar absorbing material processing by using polymeric nonwoven and conducting polymer. **Materials Research**, v. 11, p. 245-249, 2008.

GEETHARAMANI, G.; AATHMANESAN, T. Design of SRR based metamaterial antenna for 4G WiMAX applications. **International Journal of Scientific Research in Mechanical and Materials Engineering**, v. 3, n. 2, p. 15-20, 2019.

GEMS. **Radome And FSS Screen**. 2023. Disponível em: http://gems.bjdihao.com.cn/en/showroom/radome-fss/. Acesso em: 17 abr. 2023.

GENIKALA, S.; GHOSH, A.; ROY, B. Triple band single layer microwave absorber based on closed loop resonator structures with high stability under oblique incidence. **AEU-International Journal of Electronics and Communications**, v. 164, p. 154629, 2023.

GIELIS, J. A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes. **American journal of botany**, v. 90, n. 3, p. 333-338, 2003.

GOMES NETO, A. *et al.* Desenvolvimento de uma FSS Banda Dupla para Aplicações em Paredes Inteligentes. *In:* **XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais**, p. 67-71, 2017.

GOMES NETO, A. *et al.* Modeling the resonant behavior of continuously reconfigurable FSS based on four arms star geometry. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 19, n. 3, p. 415-427, 2020a.

GOMES NETO, A. *et al*. Triple band reject frequency selective surface with application to 2.4 GHz band. **Journal of Communication and Information Systems**, v. 35, n. 1, p. 77-85, 2020b.

GUSTAFSSON, M. *et al*. Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication. **IEEE transactions on antennas and propagation**, v. 54, n. 6, p. 1897-1900, 2006.

HAKIM, M. L. *et al.* Triple-Band Square Split-Ring Resonator Metamaterial Absorber Design with High Effective Medium Ratio for 5G Sub-6 GHz Applications. **Nanomaterials**, v. 13, n. 2, p. 222, 2023.

HAKIM, M. L. *et al.* Polarization insensitive symmetrical structured double negative (DNG) metamaterial absorber for Ku-band sensing applications. **Scientific reports**, v. 12, n. 1, p. 479, 2022.

HALDER, K. K. *et al*. Development of polyvinylidene fluoride–graphite composites as an alternate material for electromagnetic shielding applications. **Materials Research Express**, v. 6, n. 7, p. 075324, 2019.

HANNAN, S. *et al.* Modified-segmented split-ring based polarization and angle-insensitive multi-band metamaterial absorber for x, ku and k band applications. **IEEE ACCESS**, v. 8, p. 144051-144063, 2020.

HANNAN, S. *et al.* Polarization-independent perfect metamaterial absorber for C, X and, Ku band applications. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 3722-3732, 2021.

HARMS, P.; MITTRA, R.; KO, W. Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures. **IEEE transactions on antennas and propagation**, v. 42, n. 9, p. 1317-1324, 1994.

HAYT JR, W. H; BUCK, A. **Engineering Electromagnetics**, 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2012. Available: https://drive.google.com/file/d/1Tnl-RBGj7wZC_HvpqbHPODSqxXGuZhHQ/view. Accessed: 20 abr. 2023.

HOLLAND SHIELDING SYSTEMS BV. **EMI e RFID absorbers, ferrites e pyramids**. Disponível em: https://hollandshielding.com/. Acesso em: 19 abr. 2023.

HOSSAIN, Md B. *et al*. Triple band microwave metamaterial absorber based on double E-shaped symmetric split ring resonators for EMI shielding and stealth applications. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 1653-1668, 2022.

INDRUSIAK, T. *et al*. Hybrid carbonaceous materials for radar absorbing poly (vinylidene fluoride) composites with multilayered structures. **SPE Polymers**, v. 2, n. 1, p. 62-73, 2021.

JAYAKRISHNAN, V. M.; LIYA, M. L. A survey on frequency selective surfaces in the EM field. *In:* **2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)**. IEEE, 2020. p. 671-675.

JAHAN, MST I. *et al.* An Ultra-Thin, Triple-Band, Incident Angle-Insensitive Perfect Metamaterial Absorber. **Materials**, v. 16, n. 4, p. 1623, 2023.

JAIN, P. *et al.* An ultrathin compact polarization-sensitive triple-band microwave metamaterial absorber. **Journal of Electronic Materials**, v. 50, p. 1506-1513, 2021.

JIANG, H. *et al*. Multiband polarisation insensitive metamaterial absorber based on circular fractal structure. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, v. 10, n. 11, p. 1141-1145, 2016.

KALRAIYA, S. *et al.* Polarization and incident angle independent metasurface absorber for X-Band application. **Materials Research Express**, v. 6, n. 4, p. 045802, 2019.

KAPOOR, A.; MISHRA, R.; KUMAR, P. Frequency selective surfaces as spatial filters: fundamentals, analysis and applications. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 6, p. 4263-4293, 2022.

KIANI, G. I.; WEILY, A. R.; ESSELLE, K. P. Frequency selective surface absorber using resistive cross-dipoles. *In:* **2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**. IEEE, 2006. p. 4199-4202.

KIERMEIER, W.; BIEBL, E. New dual-band frequency selective surfaces for GSM frequency shielding. *In:* **2007 European Microwave Conference**. IEEE, 2007. p. 222-225.

KHOSHNIAT, A.; ABHARI, R. Design and evaluation of radiated emission metamaterial absorbers. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 61, n. 4, p. 1314-1321, 2019.

KNOTT, E. F.; SCHAEFFER, J. F.; TULLEY, M.T. **Radar cross section**. Estados Unidos: Institution of Engineering and Technology. 2004. Available: https://www.google.com.br/books/edition/Radar_Cross_Section/j7hdXhgwws4C?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Radar+cross+section%E2%80%AF:+its+prediction,+measurement,+and+reduction&printsec=frontcover. Accessed: 20 abr. 2023.

KUNDU, D.; MOHAN, A.; CHAKRABARTY, A. Single-layer wideband microwave absorber using array of crossed dipoles. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 15, p. 1589-1592, 2016.

LAI, S. *et al.* Optical-transparent flexible broadband absorbers based on the ITO-PET-ITO structure. **Optical Materials Express**, v. 8, n. 6, p. 1585-1592, 2018.

LANDY, N. I. *et al.* Perfect metamaterial absorber. **Physical review letters**, v. 100, n. 20, p. 207402, 2008.

LI, Y. *et al*. Design and synthesis of multilayer frequency selective surface based on antenna-filter-antenna using Minkowski fractal structures. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 63, n. 1, p. 133-141, 2014.

LI, A.; SINGH, S.; SIEVENPIPER, D. Metasurfaces and their applications. **Nanophotonics**, v. 7, n. 6, p. 989-1011, 2018.

LI, A. *et al*. High-power transistor-based tunable and switchable metasurface absorber. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 65, n. 8, p. 2810-2818, 2017.

LIU, J.; SUN, T.; WANG, C. Metasurface based ultra-thin and flexible multi-frequency perfect absorber in microwave regime. *In:* **2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)**. IEEE, 2020. p. 1122-1128.

LUO, H.; CHENG, Y. Z. Ultra-thin dual-band polarization-insensitive and wide-angle perfect metamaterial absorber based on a single circular sector resonator structure. **Journal of Electronic Materials**, v. 47, p. 323-328, 2018.

LUO, Z. *et al.* Design and analysis of an ultra-thin dual-band wide-angle polarization-insensitive metamaterial absorber for C-band application. **Optik**, v. 243, p. 166785, 2021.

LUCENA, F. A. da C. S. **Superfícies Seletivas em Frequência como superstrato para aumento de ganho em antenas**. 2018. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/31685. Acesso em: 15 abr. 2023.

MAIA, A. S. **Projeto de absorvedores de micro-ondas do tipo banda dupla usando Superfícies Seletivas em Frequência**. 2022. 116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/51294. Acesso em: 15 abr. 2023.
MAIA, A. S. *et al*. Dual-band polarization-independent absorber based on resistive Frequency selective surface. **Journal of Communication and Information Systems**, v. 37, n. 1, p. 168, 2022.

MALIK, S. *et al*. Design of Broadband Microwave Absorber with 20 dB Absorption Bandwidth. *In:* **2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)**. IEEE, 2019. p. 1-4.

MANIÇOBA, R. H. C. **Estudo do acoplamento entre superfícies seletivas de frequência assimétricas em estruturas multicamadas.** 2012. 64 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15185. Acesso em: 23 mai. 2021.

MARRA, F. *et al.* Electromagnetic wave absorption and structural properties of wide-band absorber made of graphene-printed glass-fibre composite. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 12029, 2018.

MERDAN, M. **Advanced materials for electromagnetic shielding:** fundamentals, properties, and applications. Reino Unido: Wiley, 2018. Available: https://dokumen.tips/engineering/electromagnetic-shielding-single-and-multiple-shielding-layers-using-shielding.html?page=76. Accessed: 20 abr.2023.

MESQUITA, M. D. S. *et al*. A new conductive ink for microstrip antenna and bioinspired FSS designs on glass and fiberglass substrates. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 18, n. 2, p. 227-245, 2019.

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

MONIRUZZAMAN, Md *et al*. Quad band metamaterial absorber based on asymmetric circular split ring resonator for multiband microwave applications. **Results in Physics**, v. 19, p. 103467, 2020.

MOREIRA, R. B. *et al.* Proposta de FSS em formato da espiral de Teodoro com estabilidade angular. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 7, n. 1, 2020.

MUNK, B. A. **Frequency selective surfaces:** theory and design, New York: Wiley, 2000.

NÓBREGA, C. de L. *et al*. Simple, compact, and multiband frequency selective surfaces using dissimilar sierpinski fractal elements. **International Journal of Antennas and Propagation**, v. 2015, 2015.

NÓBREGA, C. L. **Análise e projeto de superfícies seletivas de frequência com elementos pré-fractais para aplicações em comunicações indoor.** 2013. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15218. Acesso em: 12 abr. 2021.

NOHARA, E. L. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz) obtidos pela combinação de compósitos avançados dielétricos e revestimentos magnéticos**. 2003. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. Disponível em:

http://www.bdita.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=000493456. Acesso em: 20 abr. 2023.

NUMAN, A. B.; SHARAWI, M. S. Extraction of material parameters for metamaterials using a full-wave simulator [education column]. **IEEE antennas and propagation magazine**, v. 55, n. 5, p. 202-211, 2013.

OMAR, A. A.; HUANG, H.; SHEN, Z. Absorptive frequency-selective reflection/transmission structures: A review and future perspectives. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 62, n. 4, p. 62-74, 2019.

OLIVEIRA, A. C. de *et al*. Application of bioinspired antennas in the monitoring of high voltage circuit breakers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 37, n. 5, p. 4418-4426, 2022.

OLIVEIRA, M. A. de *et al*. Nature-Inspired Frequency Selective Surface in Fibonacci Spiral with Closely Resonant Bands. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 23, p. e2024280445, 2024.

ORBITSHUB. **Decodificando a importância do radome no projeto de aeronaves**. 2024. Disponível em: https://orbitshub.com/decoding-the-importance-of-radome-in-aircraft-design/. Acesso em: 11 fev. 2024.

PALANDOKEN, M.; HENKE, H. Fractal negative-epsilon metamaterial. *In:* **2010 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)**. IEEE, 2010. p. 1-4.

PATI, S. S.; SAHOO, S. Metamaterial-Based Angular Stable Polarization-Insensitive Hepta-Band Microwave Absorber With Salient Features for RCS Reduction and Antenna Radiation Improvement. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 2024.

PELLETTI, C *et al.* Analysis of finite conformal frequency selective surfaces via the characteristic basis function method and spectral rotation approaches, **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, vol. 12, pp.1404-1407, 2013.

PEIXOTO NETO, J. J. G. **Superfícies Seletivas em Frequência do tipo absorve/transmite banda larga**. 2022. 68 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/49879. Acesso em: 18 abr. 2023.

PEREIRA, G. W. *et al*. A Proposed Frequency Selective Surface (FSS) using Bio-Inspired Element for Wi-Fi 6E Applications. **Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)**, v. 15, n. 3, p. 25-34, 2023.

PURI, V.; SINGH, H. S. Design of super compact ultrathin perfect wide-angle polarization independent metamaterial absorber for C, X, and Ku band applications. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 63, n. 11, p. 2782-2790, 2021.

QU, M. *et al*. Design of graphene-based dual-polarized switchable rasorber/absorber at terahertz. **IEEE Access**, v. 8, p. 127220-127225, 2020.

RASPOPOULOS, M.; STAVROU, S. Frequency selective buildings through frequency selective surfaces. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 59, n. 8, p. 2998-3005, 2011.

ROUTRAY, P.; GHOSH, D. Design and modeling of a miniaturized multi-layer metamaterial absorber with oblique angle and polarization insensitivity. **IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications**, 2024.

SEKAR, R.; INABATHINI, S. R. An ultra-thin compact wideband metamaterial absorber. **Radioengineering,** v. 27, n. 2, p. 365, 2018.

SEMAN, F. C. *et al.* Design of a Salisbury screen absorber using frequency selective surfaces to improve bandwidth and angular stability performance. **IET microwaves, antennas & propagation**, v. 5, n. 2, p. 149-156, 2011.

SERRES, A. J. R *et. al*. Bio-Inspired Microstrip Antenna. **Trends in Research on Microstrip Antennas**, nov. 2017. Disponível em: https://www.intechopen.com/chapters/56272. Acesso em: 18 nov. 2024.

SMITH, D. R. *et al.* Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. **Physical review E**, v. 71, n. 3, p. 036617, 2005.

SINGH, A. K.; ABEGAONKAR, M. P.; KOUL, S. K. Dual-and triple-band polarization insensitive ultrathin conformal metamaterial absorbers with wide angular stability. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 61, n. 3, p. 878-886, 2019.

SHUKOOR, M. A.; DEY, S.; KOUL, S. K. A simple polarization-insensitive and wide angular stable circular ring based undeca-band absorber for EMI/EMC applications. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 63, n. 4, p. 1025-1034, 2021.

SHUKOOR, M. A.; DEY, S. Novel dual-mode polarization insensitive wide angular stable circular ring based deca-band absorber for RCS and EMI shielding applications. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 64, n. 5, p. 1337-1345, 2022.

SIEVENPIPER, D. *et al.* A tunable impedance surface performing as a reconfigurable beam steering reflector. **IEEE transactions on antennas and propagation**, v. 50, n. 3, p. 384-390, 2002.

SILVA, M. W. B. da. **Superfícies Seletivas em Frequência - FSS: concepção e projeto de absorvedores planares de micro-ondas para aplicação em WLAN, WIMAX e radar**. 2014. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

SILVA, M. W. B.; ARAUJO, H. X.; CAMPOS, A. L. P. S. Design of a narrow band and wideband absorbers using resistive FSS concept for the X and Ku band application. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 60, n. 9, p. 2128-2132, 2018.
SMITH, D. R. *et al.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. **Physical review letters**, v. 84, n. 18, p. 4184, 2000.

SONG, X. *et al*. Switchable metasurface for nearly perfect reflection, transmission, and absorption using PIN diodes. **Optics Express**, v. 29, n. 18, p. 29320-29328, 2021.

SOUTO, Á. HP *et al*. Numerical and Experimental Analysis of CSRR Structures in Bioinspired Microstrip Antenna. *In:* **2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**. IEEE, 2019. p. 1-3.

SOUZA, A. A. T. de. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética multicamada na faixa de frequência 12,4 a 18,0 GHz.** 2021. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021. Disponível em: http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/04.21.12.54/doc/publicacao.pdf. Acesso em: 16 abr. 2023.

SOUZA, J. S.; SERRES, A. J. R. GOMES NETO, A. G. Analysis of Angular Stability of FSS Based on Open Trapezoidal Rings Geometry. *In:* **2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)**. IEEE, 2021. p. 625-626.

SOUZA, J. S.; CAMPOS, A. L. P. S; SERRES, A. J. R. Design and Analysis of a Frequency-Selective Surface with Closely Resonant Bands inspired by the Oxalis tetraphylla. In: **2024 IEEE 1st Latin American Conference on Antennas and Propagation (LACAP)**. IEEE, 2024. p. 1-2.

SHUKOOR, M. A.; DEY, S. Novel dual-mode polarization insensitive wide angular stable circular ring based deca-band absorber for RCS and EMI shielding applications. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 64, n. 5, p. 1337-1345, 2022.

SU, S-W. High-gain dual-loop antennas for MIMO access points in the 2.4/5.2/5.8 GHz bands. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 58, n. 7, p. 2412-2419, 2010.

SUNG, G. HH; SOWERBY, K. W.; WILLIAMSON, A. G. Angular stable frequency selective wallpapers for mitigating indoor wireless interference. *In:* **International Symposium on Antennas and Propagation**. 2008.

TAN, D. *et al.* Development and current situation of flexible and transparent EM shielding materials. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 32, p. 25603-25630, 2021.

TAK, J.; CHOI, J. A wearable metamaterial microwave absorber. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 16, p. 784-787, 2017.

TANG, W. *et al*. Waveguide 3-D FSSs by 3-D printing technique. *In:* **2016 International Conference on Electromagnetics in AdvancedApplications (ICEAA),** Cairns, QLD, 2016, pp. 675-678.

TAO, H. *et al.* A dual band terahertz metamaterial absorber. **Journal of physics D: Applied physics**, v. 43, n. 22, p. 225102, 2010.

TONG, X. C. **Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding**. New York: CRC press, 2016.

TIRKEY, M. M.; GUPTA, N. Electromagnetic absorber design challenges. **IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine**, v. 8, n. 1, p. 59-65, 2019.

TSAI, Y. L; HWANG, R. B; LIN, Y. D. A reconfigurable beam-switching antenna based on active FSS. *In:* **2012 15 International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics**. IEEE, 2012. p. 1-4.

VARDAXOGLOU, J. C. **Frequency selective surfaces – analysis and design,** Research Studies Press: England, 1997.

VARKANI, A. R.; FIROUZEH, Z. H.; NEZHAD, A. Z. Equivalent circuit model for array of circular loop FSS structures at oblique angles of incidence. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, v. 12, n. 5, p. 749-755, 2018.

YOUSAF, A. *et al.* A highly efficient deca-band metasurface absorber for diverse microwave applications. **Waves in Random and Complex Media**, p. 1-14, 2022a.

YOUSAF, A. *et al*. A highly efficient low-profile tetra-band metasurface absorber for X, Ku, and K band applications. **AEU-International Journal of Electronics and Communications**, v. 154, p. 154329, 2022b.

YU, N.; CAPASSO, F. Flat optics with designer metasurfaces. **Nature materials**, v. 13, n. 2, p. 139-150, 2014.

WANG, Ai-xia *et al*. A three-dimensional resistive metamaterial with extremely broadband absorption. *In:* **2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)**. IEEE, 2019. p. 1-3.

WATTS, C. M.; LIU, X.; PADILLA, W. J. Metamaterial electromagnetic wave absorbers. **Advanced materials**, v. 24, n. 23, p. OP98-OP120, 2012.

WEBB, D. B.; MICHIELSSEN, E.; MITTRA, R. Thick frequency selective surfaces. *In*: **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest**. IEEE, 1992. p. 1795-1798.

WU, T. K. **Frequency selective surface and grid array**. New York: Encyclopedia RF Microwave Engineering, 1995.

WU, Y. *et al*. A transparent and flexible microwave absorber covering the whole WiFi waveband. **AIP Advances**, v. 9, n. 2, p. 025309, 2019.

ZARGHOONI, B. *et al.* Supershaped metamaterial unit-cells using the gielis formula. *In:* **2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting**. IEEE, 2015. p. 458-459.

ZENG, X. *et al*. An ultra-thin triple-band metamaterial absorber with equivalent circuit analysis. *In:* **12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018).** IET Digital Library, 2018.

ZHANG, G. R. *et al.* Analysis and design of triple-band high-impedance surface absorber with periodic diversified impedance. **Journal of Applied Physics**, v. 114, n. 16, p. 164103, 2013.

ZHANG, C. *et al*. Design and analysis of a polarization-independent and incident angle insensitive triple-band metamaterial absorber. **Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures**, v. 138, p. 115131, 2021.

ZHU, B. *et al.* Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle. **Progress In Electromagnetics Research**, v. 101, p. 231-239, 2010a.

WEIR, W. B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 1, p. 33-36, 1974