



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
DE COMPUTAÇÃO



Superfícies Seletivas em Frequência do tipo Absorve/Transmite Banda Larga

José Jaime Guimarães Peixoto Neto

Orientador: Prof. Dr. Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Telecomunicações) como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Número de Ordem do PPgEEC: D320
Natal, 18 de Setembro de 2022

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Peixoto Neto, José Jaime Guimarães.

Superfícies seletivas em frequência do tipo absorve/transmite banda larga / José Jaime Guimarães Peixoto Neto. - 2022.
68 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Natal, RN, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos.

1. Superfícies Seletivas em Frequência - Tese. 2. Absorvedor Multicamada - Tese. 3. Absorvedor Banda Larga - Tese. I. Campos, Antonio Luiz Pereira de Siqueira. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3.018.4



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO**

ATA Nº 320

Aos vinte dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e dois, foi realizada a sessão de Defesa de Tese de Doutorado na qual o doutorando JOSÉ JAIME GUIMARÃES PEIXOTO NETO apresentou o trabalho intitulado "Superfícies Seletivas em Frequência do tipo Absorve/Transmite Banda Larga". A sessão iniciou às nove horas e ocorreu de forma remota, tendo o aluno e a banca examinadora participado por videoconferência. A banca foi constituída pelos doutores: Prof. ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA CAMPOS (Orientador e Presidente da banca, UFRN), Prof. JOSE PATROCINIO DA SILVA (Examinador Interno, UFRN), Prof. MARCIO EDUARDO DA COSTA RODRIGUES (Examinador Externo ao Programa, UFRN), Prof. ALFREDO GOMES NETO (Examinador Externo à Instituição, IFPB) e Prof. MAURICIO WEBER BENJÓ DA SILVA (Examinador Externo à Instituição, UFF). Após a exposição do pós-graduando e a arguição da banca, o doutorando foi considerado APROVADO (APROVADO/REPROVADO), tendo sido lavrada esta ata, que vai assinada pelos examinadores e pelo discente. A versão final da Tese deverá ser submetida, via SIGAA, no prazo máximo de 60 dias, contemplando, caso necessário, as alterações definidas pelos membros da banca examinadora na folha de correção anexa. Conforme o Artigo 49 da Resolução 197/2013 - CONSEPE, o candidato apenas obterá o título se cumprir as exigências acima.

Dr. ALFREDO GOMES NETO, IFPB

Examinador Externo à Instituição

Dr. MAURICIO WEBER BENJÓ DA SILVA, UFF

Examinador Externo à Instituição

Dr. MARCIO EDUARDO DA COSTA RODRIGUES, UFRN

Examinador Externo ao Programa

Dr. JOSE PATROCINIO DA SILVA, UFRN

Examinador Interno

Dr. ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA CAMPOS, UFRN

Presidente

*Aos meus avós, que me criaram, e
sempre me apoiaram nesse caminho.*

Agradecimentos

A Deus, por ter conseguido alcançar esta conquista.

Aos meus avós, pais e irmãos pelas palavras de apoio e incentivo durante todos os momentos difíceis.

Ao Professor Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos, pela orientação e conselhos. Sua disponibilidade e ajuda tornaram possível a finalização dessa etapa.

A todos os professores e colegas do PPGEEC que me transmitiram seus conhecimentos e experiências acadêmicas durante esse período.

Resumo

As Superfícies Seletivas em Frequências (*Frequency Selective Surface - FSS*) estão cada vez mais sendo utilizadas em sistemas de telecomunicações devido às inúmeras vantagens apresentadas por esse tipo de estrutura, dentre elas se destacam o baixo custo, facilidade de fabricação e baixo perfil. Assim como as superfícies seletivas em frequência, os absorvedores de ondas eletromagnéticas também vêm sendo muito utilizados, principalmente, com o objetivo de solucionar o problema dos múltiplos percursos. Absorvedores são estruturas que têm como objetivo absorver ondas eletromagnéticas em uma determinada faixa de frequência, enquanto que permitem a passagem ou reflexão dessas ondas fora dela. Assim, neste trabalho se propõe a investigação da utilização de FSS, para o projeto de absorvedores multicamada, para se obter absorção em banda larga. O estudo consiste na aplicação de FSS do tipo resistiva combinadas com FSS do tipo condutora, que utilizam espiras quadradas como geometria da célula unitária, para projetar uma estrutura do tipo absorve/transmite com resposta em frequência do tipo banda larga. A estrutura proposta opera na faixa de frequências entre 2 GHz e 6 GHz. Uma análise paramétrica extensa foi efetuada para se otimizar a resposta desejada. Ao final dessa análise, duas FSS resistivas e duas condutoras foram projetadas e cascadeadas, para se obter a largura de banda desejada. As análises mostraram que o absorvedor de banda larga possui independência de polarização e estabilidade angular até 30°. Além disso, resultados experimentais mostram que a estrutura proposta pode absorver sinais em uma faixa de frequências de 2,4 a 6,13 GHz. A absorção acima de 80% ocorre em toda a faixa de frequência proposta. A estrutura pode absorver sinais para toda a banda ISM (2,4 – 2,4835 GHz), 5G a 3,5 GHz e UNII (5 – 6 GHz), sem bloquear as demais frequências, evitando múltiplos percursos nas proximidades onde o absorvedor está instalado.

Palavras-chave: Superfícies Seletivas em Frequência, Absorvedores, Multicamada, Banda Larga.

Abstract

Frequency Selective Surfaces (FSS) are increasingly being used in telecommunications systems due to the numerous advantages presented by this type of structure, among them the low cost, ease of fabrication and low profile. As well as frequency selective surfaces, electromagnetic wave absorbers have also been widely used, mainly with the objective of solving the problem of multipath. Absorbers are structures that aim to absorb electromagnetic waves in a certain frequency range, while allowing the passage of waves outside it. Thus, this work proposes to investigate the use of FSS, for the design of multilayer absorbers, to obtain broadband absorption. The study consists of the application of resistive-type FSS combined with conductive-type FSS, which use square loops as unit cell geometry, to design an absorb/transmit structure with broadband-type frequency response. The proposed structure operates in the frequency range between 2 GHz and 6 GHz. An extensive parametric analysis was performed to optimize the desired response. At the end of this analysis, two resistive and two conductive FSS were designed and cascaded to obtain the desired bandwidth. The analyzes showed that the broadband absorber has polarization independence and angular stability up to 30°. Furthermore, experimental results show that the proposed structure can absorb signals in a frequency range from 2.4 to 6.13 GHz. Absorption above 80% occurs over the entire proposed frequency range. The structure can absorb signals for the entire ISM band (2.4 – 2.4835 GHz), 5G at 3.5 GHz and UNII (5 – 6 GHz), without blocking the other frequencies, avoiding multipath in the proximity of the absorber it's installed.

Keywords: Frequency Selective Surfaces, Absorber, Multilayer, Wideband.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iv
Lista de Símbolos e Abreviaturas	v
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Metodologia	3
1.4 Organização da Tese	3
2 FSS	5
2.1 Introducao	5
2.2 Forma dos Elementos	6
2.3 FSSs Resistivas	8
2.4 Absorvedores de Micro-ondas	9
2.5 Telas de Salisbury e Jaumman	9
2.6 Proposta de um Absorvedor Utilizando FSS	11
3 ESTADO DA ARTE	13
4 RESULTADOS	30
4.1 Estruturas 1 e 2	30
4.2 Estruturas 3, 4, 5 E 6	33
4.3 Resultados e Discussões para a Estrutura Proposta	37
5 CONCLUSÃO	47
Referências bibliográficas	49

Lista de Figuras

2.1	Resposta em frequência da FSS dependendo do tipo de elemento empregado: (a) Arranjo do tipo patch condutor e seu comportamento rejeita-baixa e (b) Arranjo do tipo abertura e seu comportamento passa-faixa.	5
2.2	Grupo 1 – N-polos conectados pelo centro.	6
2.3	Grupo 2 – Espiras.	6
2.4	Grupo 3 – Interior sólido.	7
2.5	Grupo 4 – Combinações.	7
2.6	Grupo 5 – Elementos convolucionados.	7
2.7	Grupo 6 – Elementos fractais.	8
2.8	Geometria de um absorvedor de Salysbury.	10
2.9	Absorvedor de Jaumann.	10
2.10	Absorvedor do tipo absorve-transmite com geometria dipolo cruzado.	11
2.11	Absorvedor de Jaumman.	12
3.1	Modo de operação de uma estrutura absorve/transmite.	13
3.2	(a) Diagrama funcional e (b) vista esquemática do absorvedor. Tamanhos das células de (c) FSS I ($d_1 = 6$ mm, $p = 29.8$ mm, $a_1 = 9.6$ mm, $b_1 = 2.85$ mm, $c_1 = 1.2$ mm, $e_1 = 1.5$ mm, $g_1 = 5.3$ mm e $R_1 = 150\Omega$) e (d) FSS II ($d_2 = 15$ mm, $a_2 = 28.2$ mm, $b_2 = 11.85$ mm, $c_2 = 1.5$ mm, $e_2 = 1.5$ mm, $g_2 = 1.6$ mm, $a_3 = 16$ mm, $a_4 = 2.8$ mm e $R_2 = 220\Omega$).	14
3.3	a) Refletividade medida do absorvedor de dupla camada. (b) Comparação da refletividade simulada e medida [28].	15
3.4	Célula unitária do absorvedor de banda larga de dupla camada usando tinta resistiva (a) Vista projetada do absorvedor, (b) Vista lateral projetada do absorvedor (c) Vista superior da primeira camada, (d) Vista superior da segunda camada.	16
3.5	Resposta coeficiente de reflexão medida e simulada sob incidência normal da onda eletromagnética.	17
3.6	Geometria de célula unitária do absorvedor de banda larga de camada tripla usando tinta resistiva e coeficiente de reflexão simulado do absorvedor proposto usando HFSS e modelo de circuito equivalente. (a) Vista em perspectiva. (b) Vista superior da camada intermediária. (d) Vista superior da camada inferior. (e) Coeficiente de reflexão simulado do absorvedor proposto usando HFSS e modelo de circuito equivalente.	18

3.7	(a) Coeficiente de reflexão esquemático e simulado do absorvedor proposto na ausência do FSS 1 e FSS 2. (b) Coeficiente de reflexão esquemático e simulado da estrutura na ausência do FSS 1.	19
3.8	Coeficiente de reflexão simulado do absorvedor proposto. (a) Camadas dielétricas completamente cobertas com tinta resistiva. (b) Valores diferentes de condutividade.	19
3.9	Compósitos de camada única incorporados à FSS fractal de junta de triângulo de Sierpinski: (a) C_1 (b) C_2 e (c) C_3 , respectivamente, com diferentes níveis fractais $n=0, 1$ e 2	20
3.10	Efeito da espessura reduzida do compósito sobre as características R_L dos compósitos de camada única incorporados à FSS com geometria fractal de Triângulo de Sierpinski. (a) C_1 (varia abaixo de 1,7 mm); (b) C_2 (varia abaixo de 1,5 mm); (c) C_3 (varia abaixo de 1,6 mm).	21
3.11	FSS de três camadas para alta seletividade de transmissão. (a) A vista em perspectiva da célula unitária (b) as camadas superior e inferior. (c) A camada do meio. ($l_1 = 5,5$ mm, $l_2 = 57,3$ mm, $w = 0,5$ mm, $d = 0,2$ mm, $p = 7,5$ mm).	22
3.12	A estrutura do AFSS. (a) A camada com perdas do AFSS. (b) A vista em perspectiva do AFSS. ($p = 7,5$ mm, $a = 9,15$ mm, $b = 7$ mm e $c = 1,85$ mm).	23
3.13	Coeficiente de transmissão, reflexão e absorção do AFSS proposto.	23
3.14	Estrutura de célula unitária do <i>Rasorber II</i> proposto (Dimensões da estrutura: $p = 20$ mm, $w_2 = 0,8$ mm, $l_s = 6,2$ mm, $w = 0,8$ mm, $s = 0,8$ mm, $d = 3,3$ mm, $d_1 = 9,1$ mm, $d_2 = 2,5$ mm, $w_1 = 1,2$ mm, $w_2 = 0,8$ mm, $l_1 = 12,2$ mm, $d_t = 3,4$ mm, $s_t = 1$ mm; ; todos os resistores agrupados são 100Ω).	24
3.15	Transmissão, reflexão e absorção simuladas do <i>Rasorber I</i> e do <i>Rasorber II</i>	25
3.16	Configuração do absorvedor de micro-ondas composta por camadas de metal e resistivas.	26
3.17	Parâmetros-S simulados para a estrutura absorve/transmite.	27
3.18	Comparação entre os resultados simulados e medidos para o Parâmetro. a) S_{21} ; b) S_{11}	27
3.19	FSS absorve/transmite.	28
3.20	Comparação entre os resultados simulados e medidos para os parâmetros-S. a) Primeiro protótipo; b) Segundo protótipo.	29
4.1	Estrutura 1 - composta pelo absorvedor 1 (FSS Condutora 1, camada de ar de espessura d_1 e FSS Resistiva 1) separado do absorvedor 2(FSS Condutora 2, camada de ar de espessura d_3 e FSS Resistiva 2) por uma camada de ar de espessura d_2	31
4.2	Estrutura 1 - composta pelo absorvedor 2 (FSS Condutora 2, camada de ar de espessura d_1 e FSS Resistiva 2) separado do absorvedor 1(FSS Condutora 1, camada de ar de espessura d_3 e FSS Resistiva 1) por uma camada de ar de espessura d_2	31
4.3	Coeficientes de transmissão e reflexão em dB para as Estruturas 1 e 2 para valores de $d_2=20$ mm e $d_3= 20$ mm.	32

4.4	Coeficiente de absorção para as Estruturas 1 e 2 para valores de $d_2=20\text{mm}$ e $d_3=20\text{mm}$ e d_1 variando.	33
4.5	Estruturas simuladas, a) Estrutura 3; b) Estrutura 4; c) Estrutura 5; d) Estrutura 6	34
4.6	Coeficientes de transmissão e reflexão(dB) para as Estruturas 3,4,5 e 6. . .	35
4.7	Coeficiente de Absorção para as Estruturas 3,4,5 e 6, para $d_1=5\text{mm}$, $d_2=5\text{mm}$ e $d_3=5\text{mm}$	36
4.8	Coeficientes de Transmissão e Reflexão(dB) para as Estruturas 3,4,5 e 6, para $d_1=20\text{mm}$, $d_2=15\text{mm}$ e $d_3=5\text{mm}$	36
4.9	Coeficiente de Absorção para as Estruturas 3,4,5 e 6, para $d_1=20\text{mm}$, $d_2=15\text{mm}$ e $d_3=5\text{mm}$	37
4.10	Absorvedor proposto: (a) Estrutura cascadeada e (b) geometria da célula unitária.	38
4.11	Parâmetros S para espaçamentos de 5 mm e 10 mm entre as FSS.	39
4.12	Absorção para espaçamentos de 5 mm e 10 mm entre as FSS.	39
4.13	Absorção sob incidência normal e incidência oblíqua para polarização vertical.	40
4.14	Absorção sob incidência normal e incidência oblíqua para polarização horizontal.	40
4.15	<i>Setup</i> de medição do coeficiente de transmissão.	41
4.16	<i>Setup</i> de medição do coeficiente de reflexão.	41
4.17	Fotos do <i>setup</i> de medição.	42
4.18	Foto do absorvedor construído e montado.	42
4.19	Comparação entre resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão das FSSs condutora 01.	43
4.20	Comparação entre resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão das FSSs condutora 02.	44
4.21	Comparação entre resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão do absorvedor.	45
4.22	Comparação entre resultados simulados e medidos do coeficiente de reflexão do absorvedor.	46
4.23	Comparação entre resultados simulados e medidos da absorção.	46

Lista de Tabelas

2.1	Comparativo de alguns parâmetros de desempenho relativo a seis diferentes tipos de geometrias para FSS <i>freestanding</i>	8
-----	--	---

Lista de Símbolos e Abreviaturas

C_b	Condutividade de Massa
C_s	Condutividade Superficial
R_s	Resistência Superficial
Z_o	Impedância Intrínseca do Espaço Livre
Γ	Coefficiente de Reflexão
Ω	Ohm
λ_0	Comprimento de Onda no Espaço Livre
μ_0	Permeabilidade Magnética do Espaço Livre
AFSS	Superfície Absorvedora Seletiva em Frequência
dB	Decibel
FBW	Largura de Banda Fracionária
FFSS	Superfície Fractal Seletiva em Frequência
FSA	Absorvedores Seletivos em Frequência
FSR	Rasorber Seletivo em Frequência
FSS	Superfície Seletiva em Frequência
GA	Algoritmo Genético
GHz	Gigahertz
HIS	Superfície de Alta Impedância
ISM	Industrial, Científico e Médico
MGA	Algoritmo Microgenético
MHz	Megahertz
PEC	Condução Elétrica Perfeita

RAB	Largura de Banda de Absorção Relativa
RCS	Seção Transversal de Radar
TE	Transversal Elétrica
TM	Transversal Magnética
UNII	Infraestrutura de Informação Nacional não Licenciada
V	Volume
WLAN	Rede Local Sem Fio

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A ampliação das comunicações sem fio causou um aumento no uso do espectro de frequências e, com isso, observa-se um aumento de problemas de interferência eletromagnética, principalmente nas faixas não licenciadas. Some-se a isso problemas provenientes das interferências devido aos multipercursos em comunicações móveis. Os absorvedores de micro-ondas podem ser utilizados para redução de problemas ocasionados pela interferência eletromagnética e por multipercursos [1] - [3].

Um ambiente com perturbação eletromagnética controlável é uma questão importante no desenvolvimento de estruturas de absorção de ondas eletromagnéticas de radar e em problemas de interferência e compatibilidade eletromagnética. A absorção de ondas eletromagnéticas refere-se à capacidade de uma estrutura ou material de atenuar a energia de uma onda eletromagnética incidente. O controle total da radiação recebida pode ser desejável, uma vez que muitos fenômenos são inerentes aos distúrbios eletromagnéticos, como interferência, radiação espúria, vazamento e suscetibilidade, para citar alguns [4], [5].

Absorvedores eletromagnéticos são estruturas adequadas para essa finalidade. Os absorvedores piramidais são a estrutura absorvedora de radar mais famosa e utilizada devido ao seu alto desempenho em uma larga faixa de frequências [6]. Para ambientes onde a demanda por espaço não é um fator importante, o volume dos absorvedores piramidais não se torna um tema crítico. Em outras aplicações (por exemplo, redução da seção transversal do radar ou compatibilidade eletromagnética), a espessura e o peso desses absorvedores não são adequados.

Os absorvedores eletromagnéticos são divididos em diferentes tipos, como absorvedores de grafite piramidais, ultrafinos, nano ingredientes magnéticos e etc. Os absorvedores piramidais usados em câmaras anecoicas têm baixos níveis de reflexão, mas são volumosos. Como resultado, é impossível ser usado em todas as aplicações. Além disso, os absorvedores piramidais são, geralmente, usados em ambiente fechado devido à sua sensibilidade ao pó, umidade e temperatura [7].

Atualmente, a atenção de diversos pesquisadores tem se voltado ao projeto de absorvedores banda larga. Duas configurações comuns de absorvedores, a tela de Salisbury e o absorvedor de Jaumann, são estruturas comumente usadas. A tela de Salisbury consiste

em uma única camada de material com perdas sobre uma placa metálica, enquanto que o absorvedor de Jaumann consiste em várias camadas de materiais com perdas, também sobre uma placa condutora elétrica perfeita (*Perfect Electrical Conducting - PEC*) [1], [2]. Os absorvedores de Salisbury apresentam resposta em frequência do tipo banda estreita, enquanto que os absorvedores de Jaumann podem apresentar resposta em frequência do tipo banda larga. Entretanto, os absorvedores de Jaumann são mais volumosos e pesados, quando comparados à tela de Salisbury.

Uma solução para reduzir o volume e o peso de um absorvedor é usar superfícies seletivas em frequência (*Frequency Selective Surfaces - FSS*) resistivas combinadas com FSS metálicas impressas sobre materiais dielétricos. Normalmente, para se conseguir a resposta do tipo banda larga deve-se inserir FSS em estruturas dielétricas multicamadas [8] – [10]. Isso pode levar a um aumento de volume e peso, mas a estrutura final, normalmente, é menor se comparada aos absorvedores piramidais e de Jaumann, em geral.

Diversos trabalhos encontrados na literatura propõem o uso de FSS em multicamadas, para se projetar absorvedores do tipo banda larga. Em [11], os autores propuseram um método simples, rápido e eficiente para projetar absorvedores banda larga. A ideia foi modificar o método do circuito analógico para absorvedor sem perturbar a largura de banda. O absorvedor proposto com três camadas e espessura total de 15,1 mm apresentou-se como uma solução melhor que o absorvedor Jaumann.

Em [12], [13], os autores propuseram o projeto de absorvedores de micro-ondas de banda larga incorporando FSS resistiva embutidas em múltiplas camadas dielétricas e usando um algoritmo genético codificado binário (*GA*), para determinar o formato da célula unitária resistiva, bem como o número de camadas dielétricas, o material e a espessura de cada camada e a periodicidade da FSS. Por fim, um plano de terra é colocado na parte inferior da última camada.

Em [14], os autores propuseram o projeto e a implementação de um absorvedor com múltiplas FSSs resistivas. O absorvedor proposto é construído usando múltiplas camadas de FSSs resistivas, em que cada camada consiste em arranjos periódicos de padrões resistivos impressos em dielétricos de FR4 usando tinta resistiva. O projeto final apresentou uma absorção de banda larga na faixa de frequências de 2,00 a 18,50 GHz.

Em [15], foi apresentado um absorvedor comutável de banda larga independente de polarização, que exhibe uma grande largura de banda de absorção podendo ser comutado entre duas bandas de frequência (banda S em um estado de polarização e bandas C e X em outro estado). A estrutura utiliza o conceito de absorvedor analógico de circuito para obter a absorção de banda larga, enquanto o mecanismo comutável é obtido por meio da implementação de diodos PIN na geometria de múltiplas camadas. O absorvedor é composto de duas FSSs metálicas, com resistores e diodos PIN e terminadas por uma terceira camada dielétrica, com um plano de terra.

Esses trabalhos têm um ponto em comum, o uso do plano de terra na última camada. Isso faz com que o problema dos múltiplos percursos piore, nas vizinhas das estruturas nas quais esses absorvedores são montados. Assim, essa tese propõe a implementação de um absorvedor com FSSs resistivas e metálicas arranjas em múltiplas camadas, para a obtenção de uma banda larga de absorção. O uso de FSSs metálicas ao invés de um plano de terra, fará com que esse absorvedor não piore o problema de múltiplos percursos nas

vizinhanças e permitirá a absorção em banda larga.

Considerando a discussão anterior, nesta tese, se propõe um absorvedor FSS banda larga baseado em uma estrutura de FSS, cascadeadas como uma estrutura Jaumman. O projeto propõe absorção de mais de 80% da energia incidente na faixa de frequências de 2,4 a 6 GHz, absorvendo toda a banda ISM e UNII. As novidades do absorvedor proposto são o projeto simples, tamanho mais compacto, se comparado com absorvedores de Jaumman tradicionais e cobre as faixas ISM e UNII, sem o uso de plano de terra totalmente metálico, nem metal na camada resistiva. Assim, o absorvedor bloqueia apenas as bandas de frequência de interesse, deixando passar as demais, e resolve o problema dos múltiplos percursos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta tese é desenvolver um absorvedor banda larga, usando FSSs resistivas e metálicas. Para alcançar o objetivo geral é necessário atingir alguns objetivos específicos da pesquisa ao desenvolver o absorvedor, que deverá:

- absorver ondas eletromagnéticas incidentes, na faixa de frequências de 2 a 6 GHz;
- ser leve e o mais compacto possível;
- não apresentar problema de múltiplos percursos; e
- ter absorção superior a 80% dentro de toda a faixa de interesse.

1.3 Metodologia

Nesta tese foi realizada, inicialmente, com uma revisão bibliográfica sobre teoria de absorvedores, seguindo-se com uma pesquisa dos trabalhos mais relevantes sobre técnicas construtivas, técnicas de projeto, métodos de análises e métodos de otimização aplicados a absorvedores banda larga. Durante a revisão bibliográfica foi realizada uma pesquisa sobre absorvedores banda larga com o objetivo de verificar quais os tipos são mais utilizados, com a finalidade de determinar o estado da arte referente ao tema da tese.

Após a definição do estado da arte, foi proposta uma ou mais abordagens para absorvedores banda larga e em seguida foram realizadas as simulações utilizando o programa comercial HFSS (*High Frequency Structure Simulator*). As propostas que apresentaram resultados com melhor desempenho foram selecionadas para a construção dos protótipos para posterior medição dos parâmetros foram realizadas nos laboratórios do Instituto Federal da Paraíba (IFPB).

As placas de substratos que foram utilizados na construção dos protótipos foram adquiridas da Ohmega Ply.

1.4 Organização da Tese

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. Inicialmente, o Capítulo 2, consta uma descrição geral de absorvedores de micro-ondas, assim como de Superfícies Seletivas em

Frequência, fazendo um breve histórico sobre como surgiram, os tipos de estrutura, as formas encontradas na literatura, algumas aplicações, dentre outros aspectos.

O Capítulo 3, apresenta o estado da arte de absorvedores de micro-ondas com utilização de FSS, mostrando as estruturas mais usuais assim como as diversas formas de projetar absorvedores de micro-ondas multicamada utilizando FSS.

No Capítulo 4, são apresentados resultados teóricos e experimentais para as características de transmissão, reflexão e absorção, dos absorvedores multicamada utilizando FSS propostos neste trabalho. Foram realizadas comparações entre os resultados numéricos e experimentais para as estruturas propostas.

Por fim, no Capítulo 5 tem-se as conclusões dos principais pontos abordados e sugeridos nesse trabalho, como também propostas para a sua continuidade.

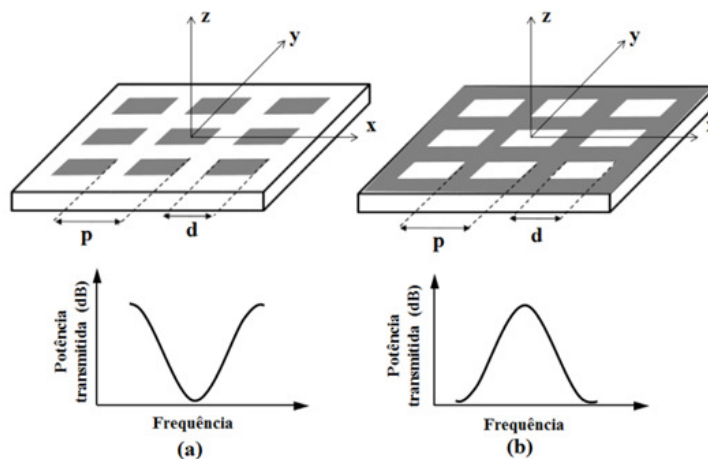
Capítulo 2

FSS

2.1 Introdução

As Superfícies Seletivas em Frequência são estruturas, geralmente, compostas por arranjos periódicos bidimensionais, constituídos por elementos do tipo *patch* condutor ou do tipo abertura, podendo ainda haver uma combinação desses dois tipos de elementos. As FSSs podem se comportar como filtros passa-faixa ou rejeita-faixa, dependendo do tipo de elemento empregado no projeto da célula unitária. Diversos parâmetros são importantes para a resposta em frequência das FSSs e são bastante relevantes no projeto do dispositivo, tais como: o tipo e a forma do elemento da célula unitária, os tipos de materiais dielétricos e as espessuras dos substratos empregados, a periodicidade da FSS, dentre outros. A resposta em frequência depende dos fatores mencionados anteriormente, bem como do tipo do elemento utilizado. Se o elemento utilizado for um *patch* condutor, a FSS se comportará como um filtro rejeita-faixa. Caso o elemento utilizado seja do tipo abertura, a FSS se comportará como um filtro passa-faixa. A Figura 2.1 ilustra esse comportamento em frequência [16].

Figura 2.1: Resposta em frequência da FSS dependendo do tipo de elemento empregado: (a) Arranjo do tipo *patch* condutor e seu comportamento rejeita-baixa e (b) Arranjo do tipo abertura e seu comportamento passa-faixa.

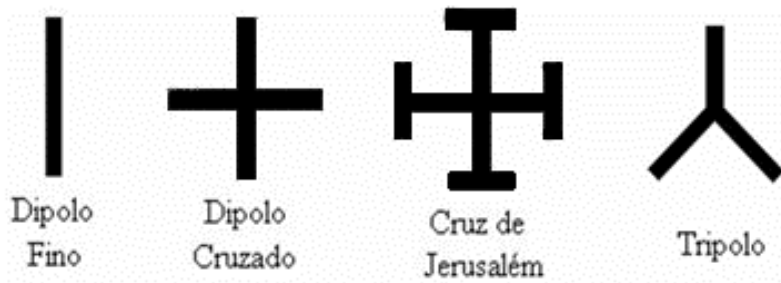


Fonte: [16].

2.2 Forma dos Elementos

Conforme mencionado anteriormente, a forma do elemento usado na célula unitária da FSS é um dos importantes parâmetros no projeto de tais estruturas. Em [8], Munk classificou os elementos em quatro grupos principais: o grupo 1 dos N – polos conectados pelo centro, o grupo 2, das espiras, o grupo 3, dos elementos de interior sólido e o grupo 4, das combinações entre os elementos dos outros grupos. Entretanto, diversas pesquisas propuseram elementos que podem ser classificados em outros grupos como o dos elementos convolucionados e dos fractais [17] – [22]. As formas mais usuais de elementos do grupo 1 são: dipolo fino (dipolo cruzado, cruz de Jerusalém e o tripolo, como podem ser vistos na Figura 2.2.

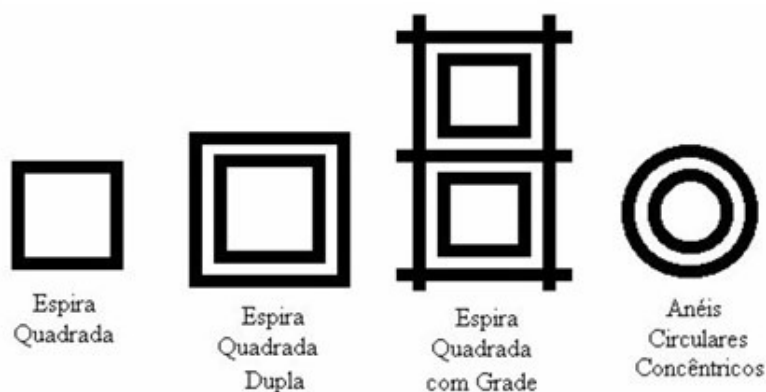
Figura 2.2: Grupo 1 – N-polos conectados pelo centro.



Fonte: [8].

O grupo 2 é formado pelas espiras e os tipos mais comuns são: espiras quadradas, quadradas duplas, quadradas com grades e anéis circulares concêntricos, como podem ser vistos na Figura 2.3.

Figura 2.3: Grupo 2 – Espiras.



Fonte: [8].

O grupo 3 é constituído por elementos de interior sólido. Os mais comuns são: os *patches* retangulares, hexagonais e circulares, como podem ser vistos na Figura 2.4.

O grupo 4, são elementos formados a partir de uma combinação dos elementos típicos. Exemplos de combinações podem ser vistos na Figura 2.5.

Figura 2.4: Grupo 3 – Interior sólido.



Fonte: [8].

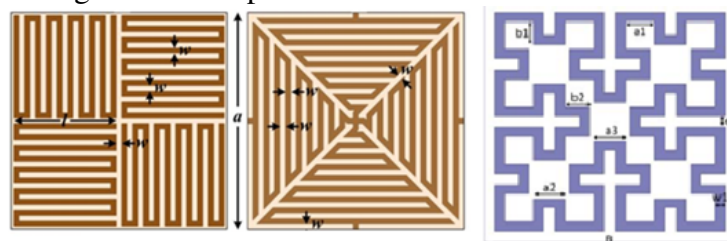
Figura 2.5: Grupo 4 – Combinações.



Fonte: [8].

Como mencionado, diversos outros trabalhos propuseram novas formas de elementos, dentre os quais podem ser citadas os elementos convolucionados e os fractais. Assim, podem ser citados dois novos grupos. O grupo 5 agrupa elementos convolucionados. O termo convolucionado é usado para descrever geometrias de células unitárias em que estruturas complexas são geradas a partir de torções, giros e, em alguns casos, de entrelaçamentos [18], [19]. Alguns exemplos de elementos convolucionados são ilustrados na Figura 2.6.

Figura 2.6: Grupo 5 – Elementos convolucionados.

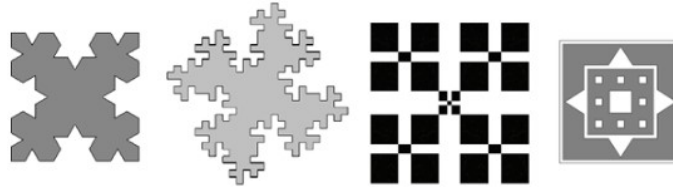


Fonte: [8].

O grupo 6 é o dos fractais, que podem ser monofractais ou multifractais [20] – [23]. Existem inúmeras formas fractais. A Figura 2.7 ilustra dois exemplos de monofractais, à esquerda, e dois exemplos de multifractais, à direita.

Os desempenhos relativos a algumas geometrias mais comuns estão listados na Tabela 1 [23]. São considerados seis elementos e quatro características: insensibilidade angular, nível de polarização cruzada; largura de banda; e menor banda de separação. O dipolo tem a pior estabilidade angular, apresentando variações da frequência de ressonância com o ângulo de incidência. Ele também apresenta a menor largura de banda, comparado aos

Figura 2.7: Grupo 6 – Elementos fractais.



Fonte: [8].

demais elementos. A razão é que quando uma onda incidente polarizada verticalmente atinge um dipolo de meia-onda, o dipolo irá ressoar independentemente do ângulo de incidência. No entanto, se a direção de incidência é oblíqua, o dipolo não irá ressoar de forma eficaz, dependendo dos ângulos incidentes, pois o comprimento projetado do dipolo na direção de incidência é menor do que a metade do comprimento de onda. Por esta razão, a frequência de ressonância do dipolo ou da FSS de elemento dipolo cruzado muda drasticamente quando as ondas têm ângulos de incidência grandes [23]. Os N-polos apresentam características regulares em termos de estabilidade angular e largura de banda, enquanto que as espiras apresentam boas características com relação a esses parâmetros. Esses resultados consideram as FSS como sendo do tipo *freestanding*, ou seja, sem dielétrico de suporte.

Tabela 2.1: Comparativo de alguns parâmetros de desempenho relativo a seis diferentes tipos de geometrias para FSS *freestanding*.

Elemento	Estabilidade angular	Polarização cruzada	Largura de banda	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 concêntricos	1	2	1	1

Classificação de desempenho: melhor =1, segundo melhor =2 ... Pior =4.

Fonte: [23].

2.3 FSSs Resistivas

Os absorvedores com superfície seletiva em frequência, ou absorvedor seletivo em frequência (*Frequency Selective Absorbers* – FSA), são apresentados como estruturas de múltiplas camadas periódicas de FSS, sendo que algumas dessas FSS são compostas por camadas resistivas. Essa FSS resistiva faz o papel da grade resistiva na tela de Salisbury. A substituição do elemento condutor de uma FSS por um elemento resistivo faz com que parte da potência dos sinais na frequência de ressonância seja dissipada na forma de calor.

A estrutura de um absorvedor seletivo em frequência é basicamente uma tela de Salisbury modificada, no qual a folha metálica inferior (plano de terra) é substituída por

uma FSS condutora e a tela resistiva é substituída por uma FSS resistiva [25]. Assim, a distância entre as duas FSS pode ser menor do que um quarto do comprimento de onda, distância mínima da tela de Salisbury. Consequentemente, a largura de banda de absorção pode ser aumentada com variação nos parâmetros da FSS.

A camada resistiva da FSS resistiva pode ser feita com diferentes materiais. Um deles é o filme fino de materiais resistivos de níquel-fósforo da OhmegaPly®. A composição química é Níquel-Fósforo Ni₉₀P₁₀ (níquel 90%, fósforo 10%). A resistência superficial é de 110 micro Ω / cm^2 , a resistividade da folha é de 10 a 250 Ω / \square e a espessura é de 1.000 a 10.000 angstroms, aproximadamente. Nesse trabalho, especificamente, foi usada a resistividade de 50 Ω / \square .

2.4 Absorvedores de Micro-ondas

Absorvedores de micro-ondas são estruturas capazes de transformar a energia proveniente de ondas eletromagnéticas em energia térmica. Esses materiais podem absorver a energia proveniente de uma onda que opera em uma única frequência ou podem funcionar em várias frequências, operando em múltiplas bandas ou na forma de banda larga.

A utilização de absorvedores visa evitar ou atenuar reflexões de ondas eletromagnéticas incidentes. Pode-se obter esse baixo coeficiente de reflexão casando-se a impedância de uma onda eletromagnética na interface espaço livre-absorvedor, resultando assim na propagação da onda incidente no absorvedor ou pode-se usar um absorvedor de várias camadas cujas ondas refletidas em suas camadas geram interferência destrutiva, como é o caso dos absorvedores de Salisbury e de Jaumann.

De acordo com o mecanismo de absorção, os absorvedores podem ser divididos em três classes: absorvedores do tipo resistivo, absorvedores do tipo dielétrico e absorvedores do tipo magnético.

Absorvedores do tipo resistivo podem ser implementados com material de carbono preto (*carbon black*), material resultante de algum pó de metal ou carboneto de silício. A taxa de absorção dos absorvedores do tipo resistivo depende da condutância e da permissividade do material.

Absorvedores do tipo dielétrico absorvem as ondas eletromagnéticas devido a polarização dielétrica de materiais como titanato de bário (BaTiO₃) e cerâmicas ferroelétricas.

Absorvedores do tipo magnético incorporam as características das perdas de ressonância e histereses, tais como ferrite e ferro carbonila.

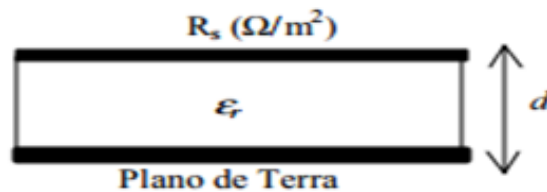
O requisito mais importante dos materiais absorvedores convencionais é a propriedade de alta absorção. Nesse trabalho dada ênfase aos absorvedores semelhantes à tela de Salisbury e de Jaumann, para, a partir dessas estruturas, se chegar ao absorvedor proposto nesse trabalho.

2.5 Telas de Salisbury e Jaumann

A tela de Salisbury foi patenteada em 1952, pelo engenheiro americano Winfield Salisbury. Sua primeira aplicação foi militar e esse absorvedor foi um dos primeiros con-

ceitos sobre material absorvedor de radar. A sua estrutura básica consiste de um plano de terra, um isolante (dielétrico sem perdas), que serve como espaçador, e um material que apresente uma resistência superficial (R_s), que pode ser um semiconductor. A separação entre o plano de terra e o material com resistência superficial é d e deve ser igual a um múltiplo de $\lambda/4$. A Figura 2.8 ilustra esse absorvedor.

Figura 2.8: Geometria de um absorvedor de Salysbury.

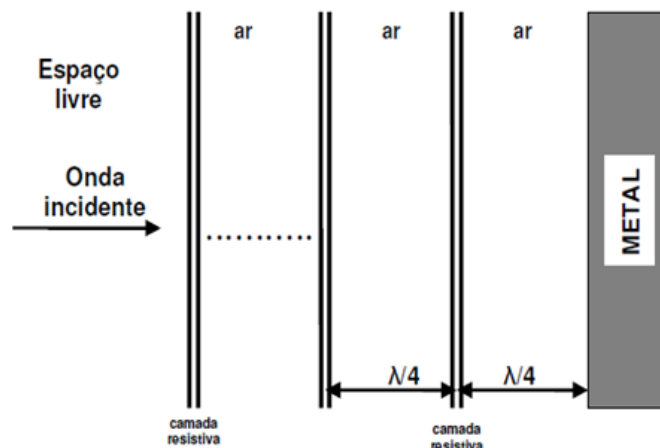


Fonte: [16].

Geralmente é usado o ar como espaçador, mas pode-se usar também um material com baixa constante dielétrica para substituir o ar, com o objetivo de se obter uma maior largura de banda. Para se obter um coeficiente de reflexão nulo, ou seja, uma absorção total da onda, deve-se utilizar um material na camada resistiva com impedância efetiva semelhante à do espaço livre, causando assim um casamento de impedância da onda.

Já o absorvedor de Jaumann é mais usado na prática. Sua principal função é a de aumentar a largura de banda absorvida, a um dado valor de refletividade com uma quantidade mínima de superfícies resistivas. Este absorvedor consiste na adição de camadas resistivas espaçadas igualmente, como pode ser visto na Figura 2.9. Ao aumentar o número de camadas resistivas, aumenta-se o desempenho do absorvedor em relação a uma maior largura de banda.

Figura 2.9: Absorvedor de Jaumann.



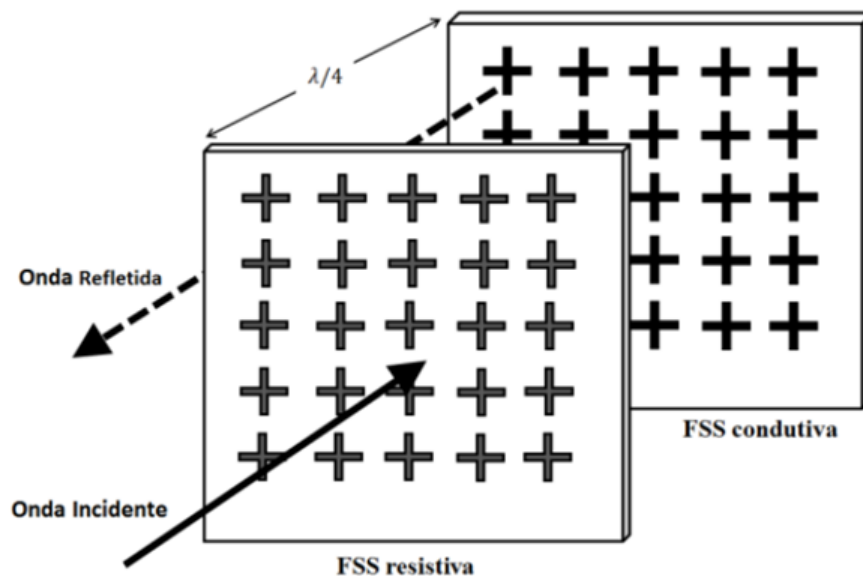
Fonte: [16].

2.6 Proposta de um Absorvedor Utilizando FSS

A estrutura de um absorvedor usando FSS é basicamente uma tela de Salisbury modificada, na qual o plano de terra é substituído por uma FSS condutora e a tela resistiva é substituída por uma FSS resistiva. Assim, apenas as frequências desejadas serão absorvidas enquanto que para as demais o absorvedor será transparente. Isso impedirá um aumento de múltiplos percursos na vizinhança do absorvedor. Além disso, a distância mínima entre as FSSs pode ser menor do que um quarto do comprimento de onda, medida que é restrita para a tela de Salisbury.

Esse tipo de absorvedor foi inicialmente proposto por Kiani [25]. A Figura 2.10 ilustra a geometria proposta [25]. No primeiro plano tem-se a FSS resistiva com geometria dipolo cruzado e, atuando como plano de terra, tem-se uma FSS condutora com a mesma geometria e as mesmas dimensões.

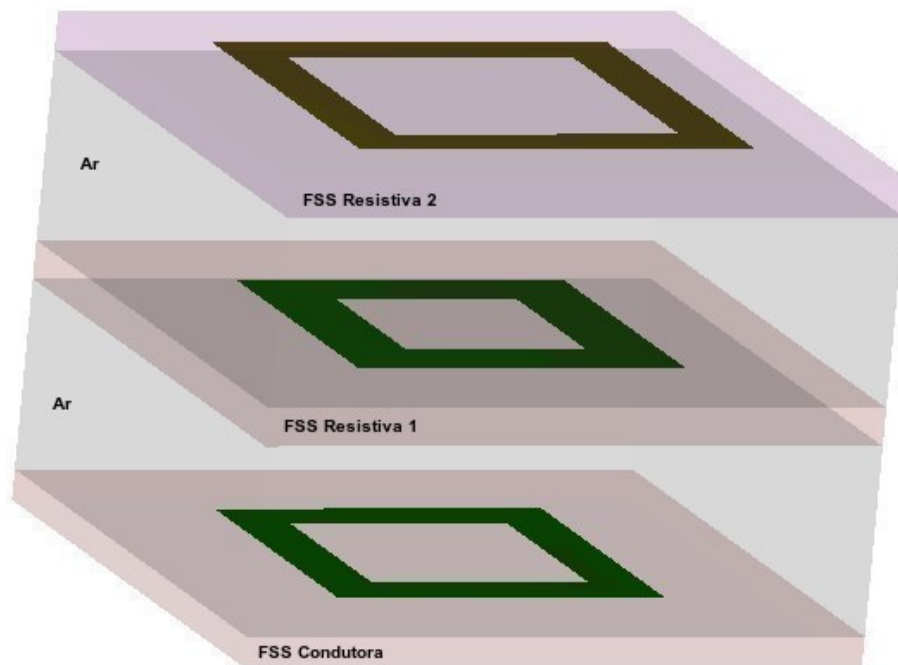
Figura 2.10: Absorvedor do tipo absorve-transmite com geometria dipolo cruzado.



Fonte: [16].

Partindo da estrutura de uma tela de Salisbury, pode-se substituir o plano de terra por uma FSS condutora com ressonância em uma frequência desejada para criar uma tela de Salisbury utilizando FSS. Com o objetivo de aumentar a largura de banda desse absorvedor pode-se converter essa tela de Salisbury em um absorvedor de Jaumman adicionando-se múltiplas FSS resistivas e múltiplas FSS condutoras, como ilustrado na Figura 2.11.

Figura 2.11: Absorvedor de Jaumman.



Fonte: Autoria própria.

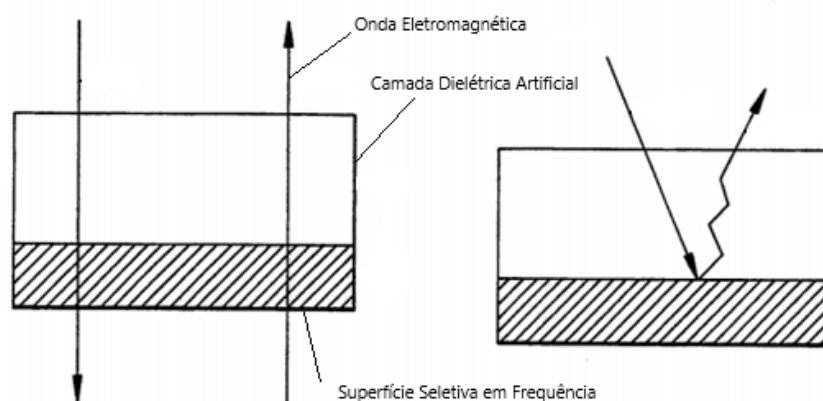
Capítulo 3

ESTADO DA ARTE

O primeiro registro de estrutura do tipo transmite/absorve utilizando FSS foi em [26], no qual foi proposto colocar um material dielétrico artificial sobre uma superfície seletiva em frequência para absorver a energia de ondas eletromagnéticas em uma faixa específica de frequência, enquanto permitia a passagem de ondas eletromagnéticas fora dessa faixa de frequência. Sugeriu-se aplicar essa estrutura para fabricação de componentes de radome com o objetivo de diminuir a área de seção transversal de radar (*Radar Cross Section – RCS*). Na época, a grande vantagem na utilização dessas superfícies seletivas em frequência se dava pelo fato de que os sinais transmitidos fora da frequência de operação da FSS não eram atenuados ou distorcidos, enquanto que as ondas dentro da faixa de operação que incidiam sobre a estrutura, tinham sua energia atenuada, sob a forma de calor, na superfície seletiva em frequência.

O conceito dessa estrutura absorve/transmite pode ser visto na Figura 3.1, mostrando como uma onda eletromagnética entrando e saindo da estrutura se comporta quando está fora da faixa de operação da estrutura projetada e como se comporta quando está na faixa de operação.

Figura 3.1: Modo de operação de uma estrutura absorve/transmite.

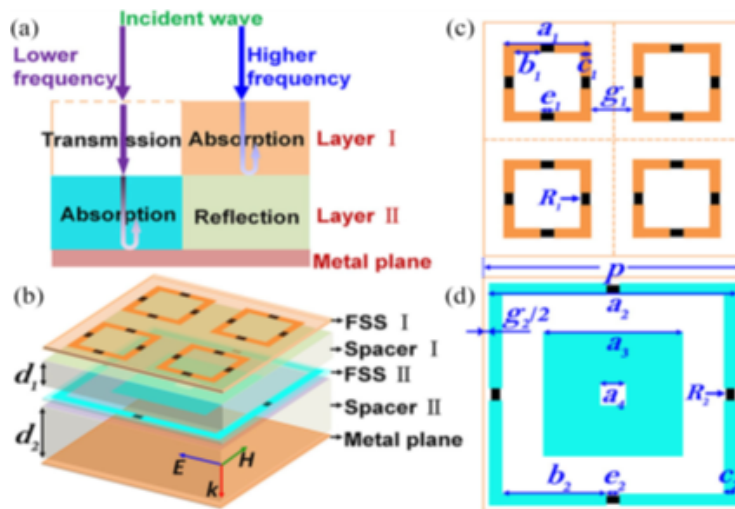


Fonte: [26].

Recentemente, o projeto de absorvedores vem utilizando camadas de FSS resistiva e condutora, como é mostrado em [14, 27, 29], a estrutura básica do absorvedor apresenta uma camada superior composta por uma FSS resistiva (com perdas), que consiste em um

patch metálico resistivo com resistores acoplados, separado de uma FSS condutora (sem perdas) do tipo abertura por um material espaçador de espessura h_1 . Pode-se também inserir uma camada inferior composta de um plano metálico, separado da FSS condutora por uma camada espaçadora de espessura d_2 , como pode ser visto na Figura 3.2. Em [28] o dielétrico utilizado nas FSS foi o FR4 de espessura 0,15mm, como espaçador entre as camadas foi utilizado uma espuma chamada de *honeycomb*. O período da célula unitária da FSS 1 é igual a metade do período da célula unitária da FSS 2.

Figura 3.2: (a) Diagrama funcional e (b) vista esquemática do absorvedor. Tamanhos das células de (c) FSS I ($d_1 = 6$ mm, $p = 29.8$ mm, $a_1 = 9.6$ mm, $b_1 = 2.85$ mm, $c_1 = 1.2$ mm, $e_1 = 1.5$ mm, $g_1 = 5.3$ mm e $R_1 = 150\Omega$) e (d) FSS II ($d_2 = 15$ mm, $a_2 = 28.2$ mm, $b_2 = 11.85$ mm, $c_2 = 1.5$ mm, $e_2 = 1.5$ mm, $g_2 = 1.6$ mm, $a_3 = 16$ mm, $a_4 = 2.8$ mm e $R_2 = 220\Omega$).



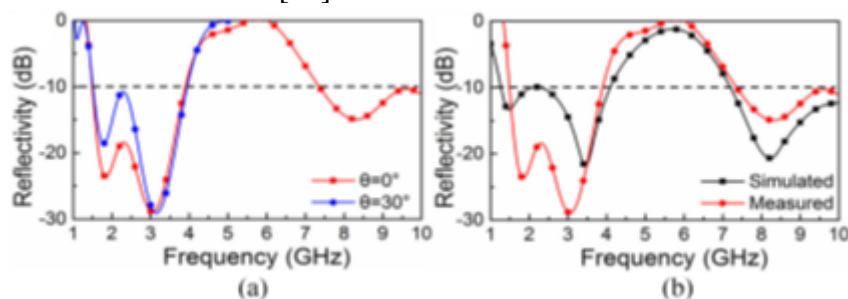
Fonte: [28].

A FSS 1 é projetada com a função de absorção de sinais em maior frequência e uma janela de transmissão em menor frequência, enquanto a FSS 2 é projetada com um desempenho de absorção em menor frequência e uma forte janela de reflexão em maior frequência. A FSS 1 está no topo da estrutura do absorvedor devido a sua atuação como uma passa-baixas, permitindo que as ondas incidentes sejam transmitidas para a camada 2 em baixa frequência e sejam absorvidas. Enquanto isso, a onda incidente é absorvida em alta frequência pela camada 1, uma vez que a camada 2 atua como um substrato de forte reflexão na parte inferior da estrutura do absorvedor. Essa combinação entre as camadas de FSS tem como objetivo aumentar a largura de banda de absorção. Foi obtida uma refletividade abaixo de -10dB na faixa de frequência de 1,3 até 4,1 GHz e 7,2 até 10 GHz para incidência normal, a banda fracionária foi de 154% e a relação entre a maior frequência de operação e a menor frequência de operação é de 7,7 vezes. A grande vantagem dessa estrutura está no alto valor de banda fracionária obtido, além de uma ampla faixa de operação.

Na Figura 3.3(a), pode ser visto a estabilidade angular da estrutura, mesmo com uma mudança no ângulo de incidência de 0° para 30° , a resposta em frequência variou pouco.

Essa estabilidade angular é atribuída à simetria da estrutura, os resistores foram adicionados na estrutura de forma simétrica (um em cada lado da espira quadrada); na Figura 3.3(b) os resultados simulados e medidos apresentam a mesma banda de operação, as pequenas diferenças entre os resultados são devido a um problema de fabricação e por erros no sistema de calibração da medição. Esses erros de fabricação são algo comum na maioria das estruturas absorvedoras presentes na literatura.

Figura 3.3: a) Refletividade medida do absorvedor de dupla camada. (b) Comparação da refletividade simulada e medida [28].

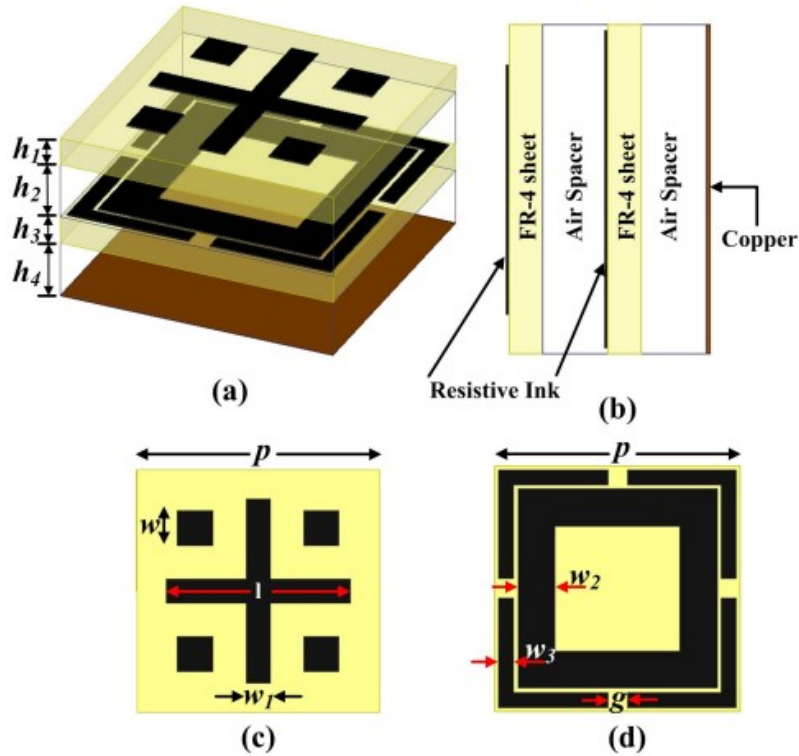


Fonte: [28].

Em [14], [27] são mostrados projetos de absorvedores insensíveis à polarização, utilizando FSS e a aplicação de uma camada de tinta resistiva sobre o substrato. A utilização dessa tinta é vantajosa em comparação a utilização de resistores concentrados, pois o seu custo de fabricação é baixo. O valor desejado da resistência da superfície pode ser alcançado variando a condutividade da tinta. As vantagens das estruturas propostas em comparação com outras estruturas presentes na literatura são uma ampla largura de banda de absorção, alta largura de banda fracionária e baixa espessura. Um fator importante na utilização dessa tinta é de alcançar valores específicos de resistência superficial, visto que geralmente os materiais resistivos tem uma resistência superficial pré-determinada, fazendo assim com que essa variável de projeto seja limitada a poucos valores. A aplicação da tinta é um processo que deve ser feito com cuidado e de forma uniforme para evitar o acúmulo de camadas de tinta que se sobrepõem.

A estrutura apresentada em [27], consiste em um absorvedor de dupla camada de FSS, podendo a geometria de sua célula unitária ser vista na Figura 3.4. As camadas de tinta resistivas com perdas são impressas em um substrato dielétrico FR-4 de baixo custo. O absorvedor proposto é apoiado por uma placa de metal com o objetivo de zerar a transmissão. Os padrões resistivos são impressos em folhas FR-4 usando tinta resistiva YShield HSF-74 com condutividade de 664 S/m e uma espessura de 50 μ m com a tecnologia de serigrafia.

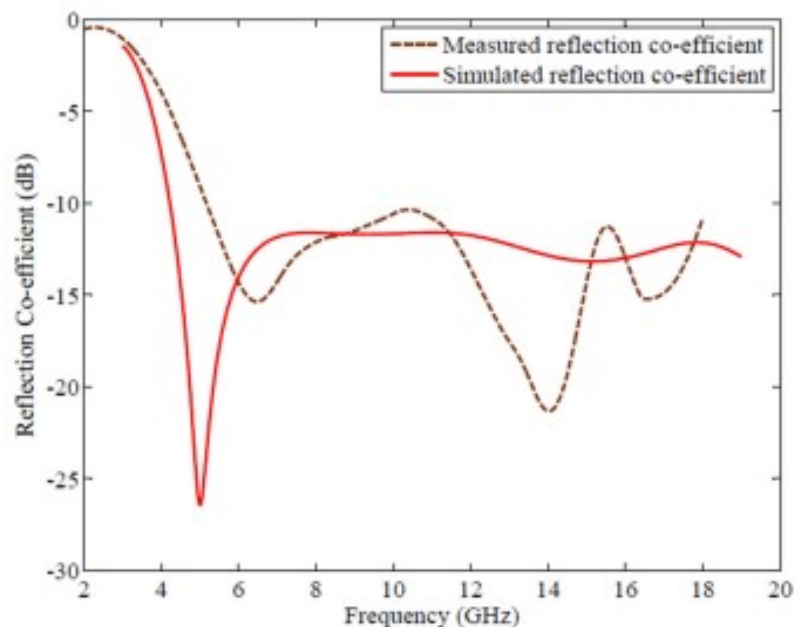
Figura 3.4: Célula unitária do absorvedor de banda larga de dupla camada usando tinta resistiva (a) Vista projetada do absorvedor, (b) Vista lateral projetada do absorvedor (c) Vista superior da primeira camada, (d) Vista superior da segunda camada.



Fonte: [27].

Na Figura 3.5 pode ser vista a comparação entre a resposta simulada e a resposta medida do absorvedor proposto. A diferença significativa nessas respostas em frequência foi atribuída a problemas durante a construção, como foi o caso da aplicação da tinta de maneira não uniforme e do aumento de espessura na segunda camada, de 0,155mm para 0,3mm devido a problemas na serigrafia. A resposta simulada mostra um coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB na faixa de frequência de 4,2 GHz a 19 GHz, enquanto que a resposta medida mostra um coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB na faixa de frequência de 5 GHz até 18 GHz. A largura de banda fracionária do absorvedor é de 132,74% e sua espessura é de $0,08\lambda_L$, sendo λ_L igual ao comprimento de onda na frequência inicial de operação. Apesar do problema de construção do absorvedor, a largura de banda não variou de forma significativa, e a largura de banda de operação dessa estrutura é muito ampla.

Figura 3.5: Resposta coeficiente de reflexão medida e simulada sob incidência normal da onda eletromagnética.



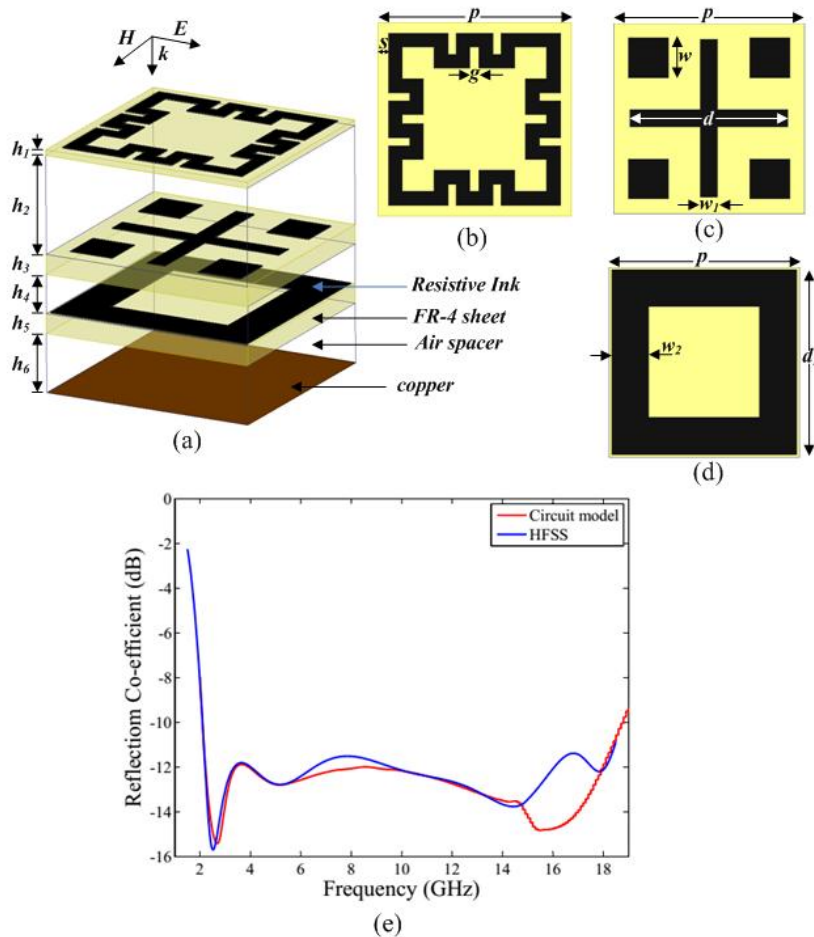
Fonte: [27].

No trabalho [14] foi adicionada uma camada de FSS na estrutura do trabalho [27]. A geometria da célula unitária das camadas de FSS foi modificada, como pode ser visto na Figura 3.6, foi utilizada a mesma tinta resistiva do trabalho [27], porém o método usado no processo de construção da estrutura foi diferente, pois substituiu-se também a camada de ar por uma camada de espuma, ROHACELL 71-HF, de permissividade $\epsilon_r = 1,04$ com diferentes espessuras de 5, 3, e 2 mm entre as camadas.

Observou-se uma boa concordância entre a resposta em frequência simulada pelo *software* e a resposta obtida através no modelo de circuito equivalente proposto. Foi alcançada uma refletividade menor que -10 dB na faixa de frequência de 2,00 a 18,5 GHz, abrangendo as bandas S, C, X e Ku. A largura de banda fracionária do absorvedor é de 160,97% a 10,25 GHz. A espessura total do absorvedor proposto é de $0,082\lambda_L$ na frequência de operação mais baixa da banda de absorção.

Foram simuladas as respostas em frequência do absorvedor para a ausência das FFS 1 e FSS 2, como pode ser visto na Figura 3.6. Dessa forma podem ser estudadas as contribuições individuais das camadas do absorvedor. Para a ausência das camadas de FSS 1 e FSS 2, o coeficiente de reflexão permanece abaixo de -10 dB, da frequência 11,78 a 18,51 GHz, enquanto que ao inserir a camada de FSS 2, obteve-se um coeficiente de reflexão abaixo de -10 dB na faixa de frequência entre 5,27 até 17,63 GHz.

Figura 3.6: Geometria de célula unitária do absorvedor de banda larga de camada tripla usando tinta resistiva e coeficiente de reflexão simulado do absorvedor proposto usando HFSS e modelo de circuito equivalente. (a) Vista em perspectiva. (b) Vista superior da camada intermediária. (d) Vista superior da camada inferior. (e) Coeficiente de reflexão simulado do absorvedor proposto usando HFSS e modelo de circuito equivalente.

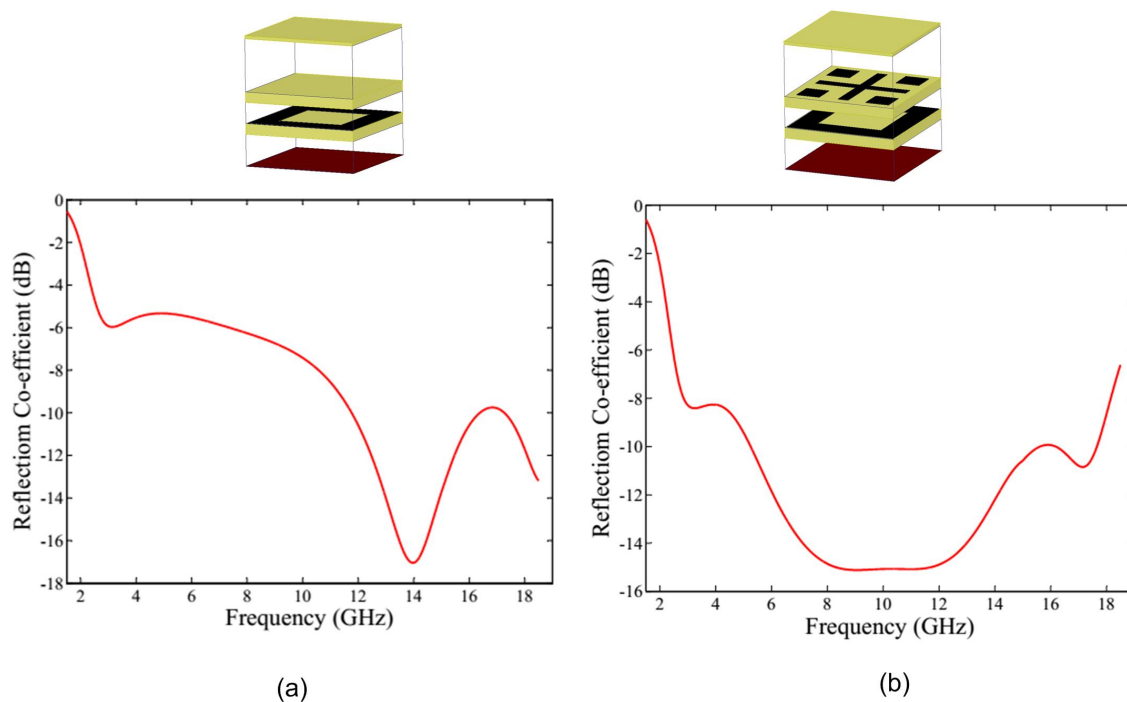


Fonte: [14].

Ao adicionar a camada superior de FSS na estrutura e cobrir completamente todas as camadas de FSS com tinta resistiva, obteve-se o coeficiente de reflexão visto na Figura 3.7(a), mostrando assim que apenas o padrão periódico de tinta resistiva com configuração específica poderá fornecer uma boa absorção à estrutura. Estudou-se também a variação da resposta da estrutura para valores diferentes de condutividade da tinta resistiva utilizada. Como pode ser visto na Figura 3.8(b). Deve-se escolher um valor ideal da condutividade da tinta para obter uma melhor resposta. Para esse absorvedor em específico, foi escolhido o valor de 664 S/m. Entre as vantagens apresentadas por esse tipo de estrutura, estão uma área de célula unitária de $0,073\lambda_L$, uma espessura total de $0,082\lambda_L$ e uma relação entre a frequência inferior e frequência superior $\left(\frac{f_L}{f_H}\right)$ de $\left(\frac{1}{9,92}\right)$. As contribuições trazidas por esse trabalho são relativas à utilização da tinta resistiva que trouxe muitos benefícios como baixo-custo de produção e permitir uma maior liberdade no pro-

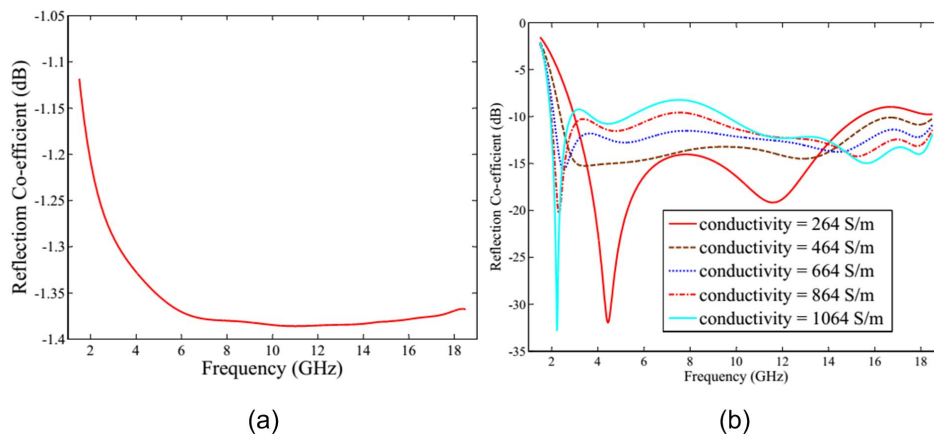
jetto, visto que valores específicos de resistência superficial podem ser atingidos com um baixo-custo financeiro e com baixo acréscimo nas dimensões físicas do absorvedor.

Figura 3.7: (a) Coeficiente de reflexão esquemático e simulado do absorvedor proposto na ausência do FSS 1 e FSS 2. (b) Coeficiente de reflexão esquemático e simulado da estrutura na ausência do FSS 1.



Fonte: [14].

Figura 3.8: Coeficiente de reflexão simulado do absorvedor proposto. (a) Camadas dielétricas completamente cobertas com tinta resistiva. (b) Valores diferentes de condutividade.

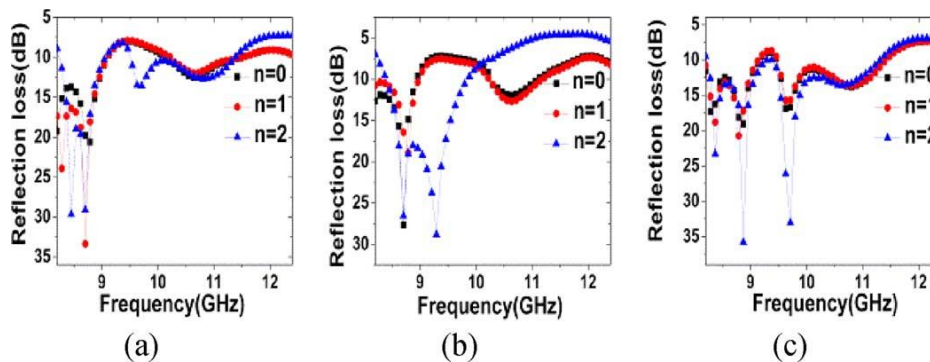


Fonte: [14].

Em [29] é mostrado o projeto de um absorvedor multicamadas utilizando metamateriais absorvedores juntamente com FSS de geometria fractal. A utilização dessa combinação de estruturas busca obter absorvedores que trabalhem na faixa de gigahertz, com maior largura de banda de absorção e baixa espessura total do absorvedor, sendo o primeiro passo é estudar a composição do composto heterogêneo a ser usado no revestimento, tendo sido escolhido o Ti por causa da sua grande perda dielétrica e alta resistividade, e o Fe_3O_4 foi escolhido por apresentar alta magnetização de saturação e alta estabilidade térmica. É desejável escolher a fração ideal de peso das partículas magnéticas de Fe_3O_4 e dielétrico Ti, além de ajustar o tamanho e a forma das partículas para obter as propriedades EM necessárias. Foi utilizado GA para obter a composição dos compósitos heterogêneos, bem como a espessura dessas camadas, três soluções ótimas foram achadas. A estrutura do absorvedor de multicamada é composta por 3 partes, sendo elas, uma chapa de liga de alumínio (Al) com espessura de 2,0 mm como base, camadas intermediárias de compósitos e uma camada superior de FSS fractal impressa sobre a camada de compósito.

Foram realizados testes quanto a utilização da geometria fractal e de sua dimensão fractal. Para comparar as estruturas fractais utilizadas (Triângulo de Sierpinski, Carpete de Sierpinski e Minkowski *loop*) utilizou-se dimensão fractal de $n=0, 1$ e 2 , nesse caso foram introduzidas essas geometrias fractais nas camadas simples de compósitos, C_1, C_2 e C_3 , com espessuras de 1,7mm, 1,5mm e 1,6mm respectivamente, as melhores características de absorção são obtidas com C_3 devido à polarização interfacial e a maior largura de banda obtida entre as estruturas foi com a escolha da geometria do triângulo de Sierpinski, como pode ser visto na Figura 3.9.

Figura 3.9: Compósitos de camada única incorporados à FSS fractal de junta de triângulo de Sierpinski: (a) C_1 (b) C_2 e (c) C_3 , respectivamente, com diferentes níveis fractais $n=0, 1$ e 2 .

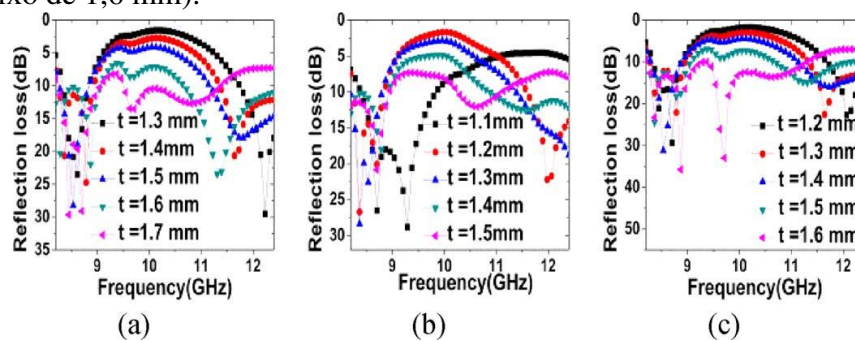


Fonte: [29].

Também foi analisado o efeito da espessura t , das estruturas de camada simples C_1, C_2 e C_3 com t variando para valores de espessura menores que os encontrados anteriormente, $C_1 = 1,7\text{mm}$, $C_2 = 1,5\text{mm}$ e $C_3 = 1,6\text{mm}$. Observou-se que valores menores de espessura degradam a largura de banda de absorção das estruturas, com exceção da estrutura C_2 , devido ao aumento da capacitância entre uma parte da FSS e o plano de aterramento para C_2 . O maior ϵ_r' de C_2 pode ser o motivo de alta capacitância entre a FSS e o plano de

terra, Como pode ser visto na Figura 3.10.

Figura 3.10: Efeito da espessura reduzida do compósito sobre as características R_L dos compósitos de camada única incorporados à FSS com geometria fractal de Triângulo de Sierpinski. (a) C_1 (varia abaixo de 1,7 mm); (b) C_2 (varia abaixo de 1,5 mm); (c) C_3 (varia abaixo de 1,6 mm).

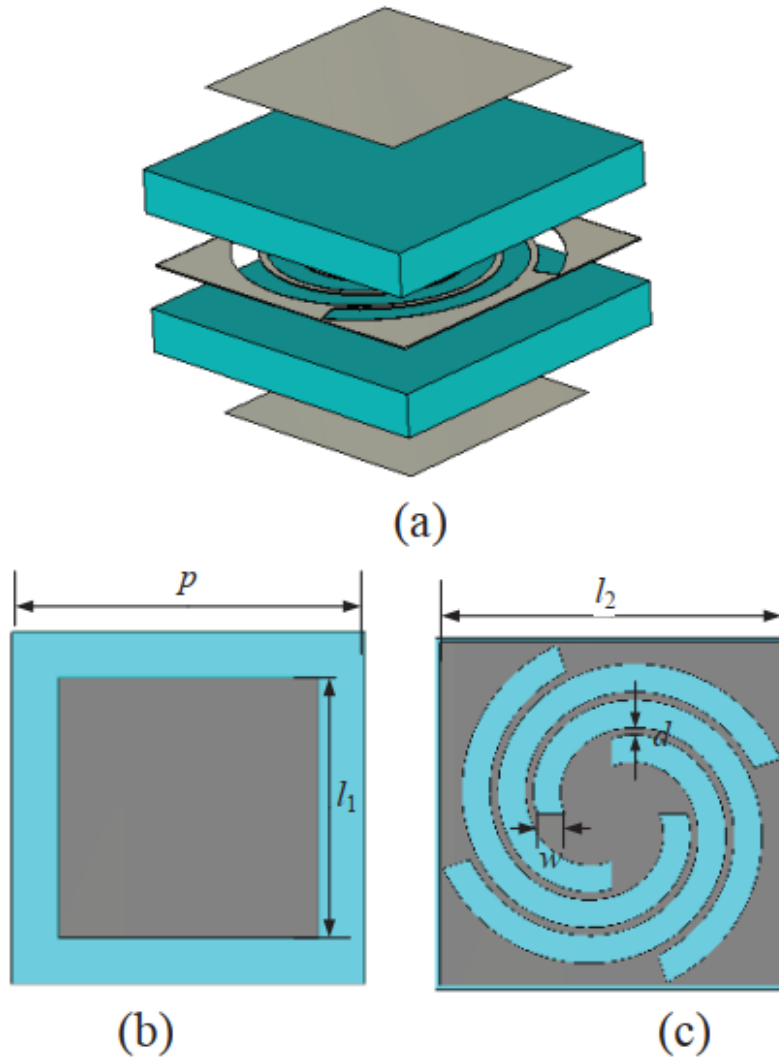


Fonte: [29].

O aprimoramento da largura de banda, bem como a absorção, é observado com um aumento correspondente no nível de iteração fractal. Logo conclui-se que a contribuição do trabalho está na utilização de materiais heterogêneos escolhidos com base no estudo de suas composições, no estudo da espessura dessas camadas e da utilização de uma geometria fractal que permitiu a obtenção de uma ampla largura de banda de absorção, além da redução da espessura total do absorvedor.

Uma outra forma presente na literatura que pode ser aplicada a AFFS (*Absorptive Frequency Selective Surface*) para obter absorvedores de alta seletividade na banda de passagem é a utilização de elementos ativos na camada com perdas da AFSS, como mostrado no trabalho [30]. A estrutura apresentada consiste em um anel quadrado com 12 ressonadores interdigitais e 4 resistores na camada com perdas, enquanto a camada sem perdas é composta por uma FSS de acoplamento com três camadas. A resposta obtida com essa estrutura apresenta uma banda passante em 3dB de 7,8 a 12 GHz, com a largura de banda fracionária (FBW) superior a 42% e com coeficiente de reflexão inferior a -10 dB na faixa de frequência de 4 a 16,5 GHz. A FSS altamente seletiva proposta pode ser vista na Figura 3.11. Sua estrutura consiste em dois substratos metálicos F4B separados por uma distância de 2mm. A FSS é composta por três camadas metálicas que são impressas em dois substratos, grudados um ao outro com cola, a célula unitária da FSS é impressa nas camadas superior e inferior, como pode ser visto na Figura 3.11 (b), e a FSS impressa na camada entre os substratos pode ser visto na Figura 3.11(c).

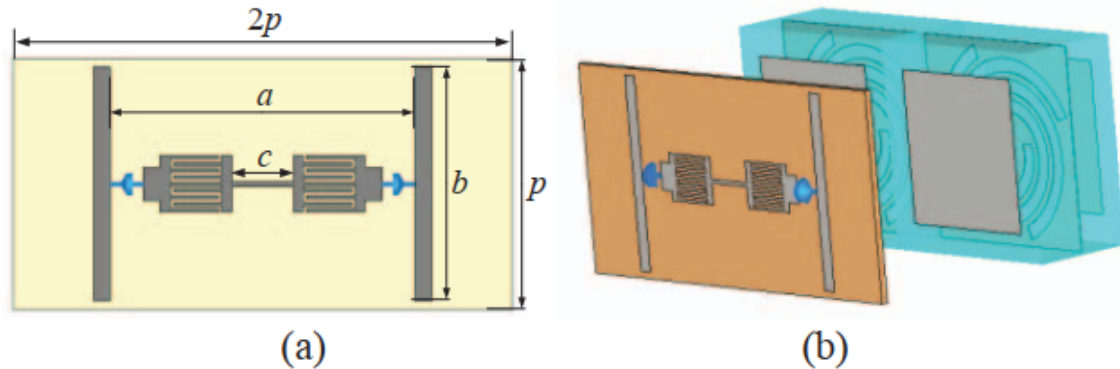
Figura 3.11: FSS de três camadas para alta seletividade de transmissão. (a) A vista em perspectiva da célula unitária (b) as camadas superior e inferior. (c) A camada do meio. ($l_1 = 5,5$ mm, $l_2 = 57,3$ mm, $w = 0,5$ mm, $d = 0,2$ mm, $p = 7,5$ mm).



Fonte: [30].

Foi adicionada ao AFSS uma folha resistiva (camada com perdas) que é suportada por um substrato com $\epsilon_r = 3,48$ e $\tan\delta = 0,037$ e a espessura do substrato é de 0,254 mm, como pode ser visto na Figura 3.12. As duas ressonâncias interdigitais no meio ressoam a 10 GHz e a frequência de ressonância pode ser expandida em cascata. Em particular, a distância entre a camada com perdas e a camada sem perdas é de 8 mm e o valor das resistências utilizadas é de 150Ω .

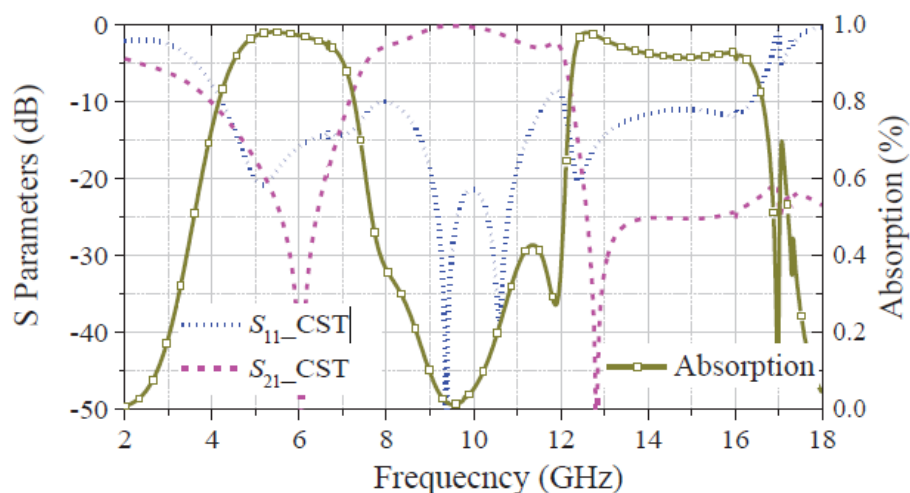
Figura 3.12: A estrutura do AFSS. (a) A camada com perdas do AFSS. (b) A vista em perspectiva do AFSS. ($p = 7,5$ mm, $a = 9,15$ mm, $b = 7$ mm e $c = 1,85$ mm).



Fonte: [30].

A AFSS alcança absorção superior a 90%, nas bandas de 4.5 GHz a 7 GHz e 12.3 GHz a 16.3 GHz, como pode ser visto na Figura 3.13. A zona de transição entre a banda de transmissão e a banda de absorção é relativamente estreita, causando assim uma rápida mudança entre os estados de absorção e transmissão. A largura de banda para reflexão menor que -10dB está entre 4,2 GHz e 16,4 GHz, a banda de transmissão em 3dB vai de 7,8 GHz a 12 GHz. Esses resultados mostram que o AFSS pode ser aplicado para transmitir os sinais de radar na banda de transmissão e absorver os sinais indesejados da banda de transmissão. Este trabalho mostra como elementos ativos podem ser usados na camada com perdas de um absorvedor de FSS para aumentar a largura de banda de absorção dessa estrutura. Outro fator a ser observado é a redução das dimensões da estrutura ao imprimir três camadas de FSS em dois substratos.

Figura 3.13: Coeficiente de transmissão, reflexão e absorção do AFSS proposto.

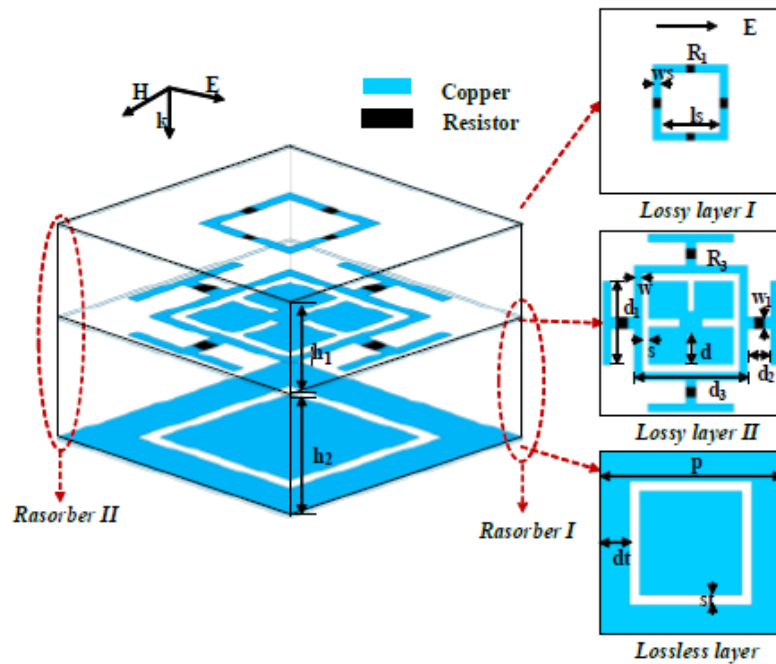


Fonte: [30].

No artigo em [31] é mostrado um *Rasorber* seletivo em frequência (FSR) composto

pelo cascadeamento de duas camadas sem perdas sobre uma camada de FSS com perdas, separadas por duas camadas espaçadoras de ar, ao utilizar duas camadas sem perdas, obteve-se duas bandas de absorção independentes, esse tipo de estrutura apresenta vantagens em termos de largura de banda de absorção e estabilidade de espalhamento. Na Figura 3.14 pode ser visto a estrutura da célula unitária do *Rasorber* II proposto, o protótipo é estruturado da seguinte forma, uma camada superior com perdas, utilizando uma camada I de geometria em anel metálico quadrado carregada com resistores concentrados, separado por uma camada de ar de uma camada com perdas II composta de elementos híbridos do tipo abertura quadrada carregados com resistores concentrados, abaixo dessa camada está uma camada sem perdas composta por uma FSS passa-banda do tipo abertura com elementos quadrados, separado da camada com perdas II por outra camada de ar.

Figura 3.14: Estrutura de célula unitária do *Rasorber* II proposto (Dimensões da estrutura: $p = 20$ mm, $w_2 = 0,8$ mm, $l_s = 6,2$ mm, $w = 0,8$ mm, $s = 0,8$ mm, $d = 3,3$ mm, $d_1 = 9,1$ mm, $d_2 = 2,5$ mm, $w_1 = 1,2$ mm, $w_2 = 0,8$ mm, $l_1 = 12,2$ mm, $d_t = 3,4$ mm, $s_t = 1$ mm; ; todos os resistores agrupados são 100Ω).

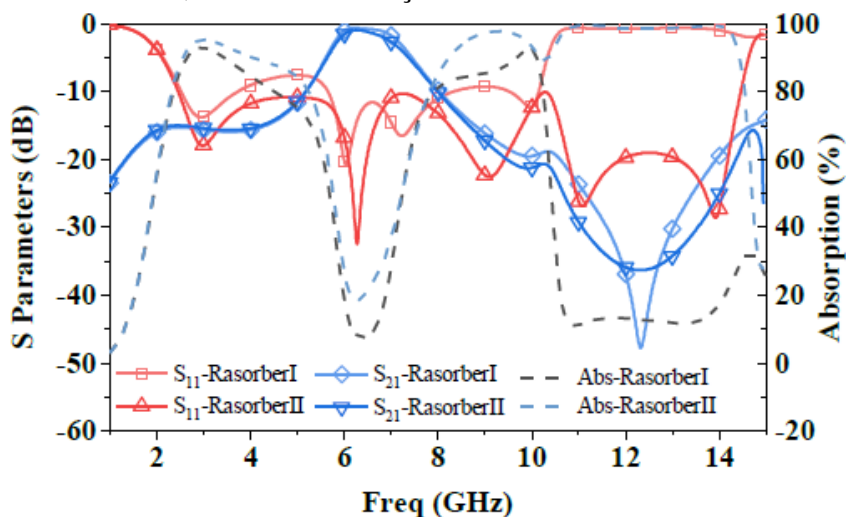


Fonte: [31].

Primeiramente foi projetado o *Rasorber* I, para o qual a frequência de ressonância da FSS passa-banda é a mesma frequência de ressonância da camada com perdas II. Essa estrutura se comporta como um filtro passa-banda assimétrico de segunda ordem apresentando mais de 80% de absorção nas duas bandas de operação, que estão localizadas na banda inferior de 2,3 a 4,5 GHz e na banda superior de 7,9 a 10,3 GHz. Após projetar esse *Rasorber* I, foi adicionada na parte superior uma outra camada com perdas, essa camada foi cascadeada na parte superior da estrutura, pois para baixas frequências a resposta quase não é afetada. A resposta em frequência das estruturas (*Rasorber* I e *Rasorber* II) pode

ser observada na Figura 3.15. Pode-se observar que a adição da camada com perdas I provocou uma ampliação da banda de absorção para a faixa de frequências entre 7,8 GHz até 14,6 GHz, ampliando essa banda de absorção em 4,3 GHz, mostrando assim que a adição de uma camada com perdas à estrutura de um absorvedor provoca um aumento na banda de operação desse absorvedor.

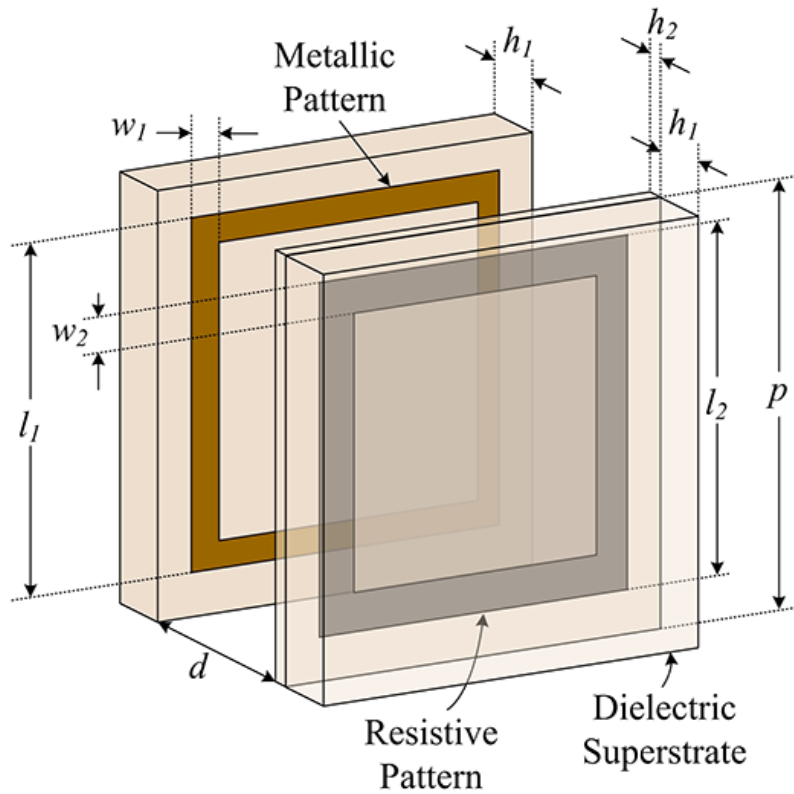
Figura 3.15: Transmissão, reflexão e absorção simuladas do *Rasorber* I e do *Rasorber* II.



Fonte: [31].

O trabalho [32] apresenta um absorvedor de micro-ondas utilizando FSS que opera com ampla largura de banda e é estável angularmente para polarizações TE e TM e baixos ângulos de incidência. A estrutura do absorvedor é composta por uma FSS resistiva e uma FSS condutora com célula unitária de geometria de espira quadrada, como pode ser visto na Figura 3.16. Essa estrutura foi projetada para operar na faixa do ISM. A diferenciação desse trabalho é a substituição do plano de terra por uma FSS condutora, com o objetivo de ampliar a largura de banda de operação do absorvedor, além de utilizar a geometria de espira quadrada em ambas as FSS para obter estabilidade angular e independência de polarização.

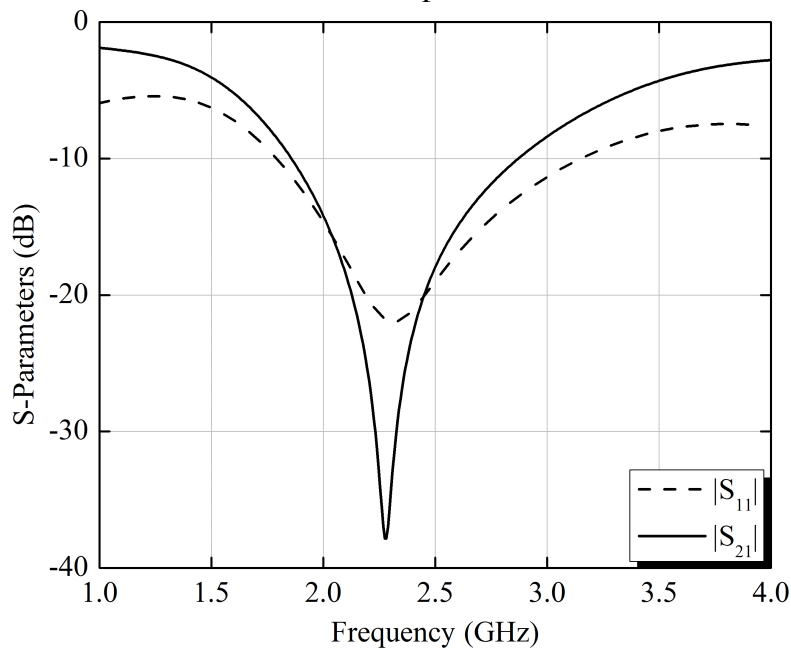
Figura 3.16: Configuração do absorvedor de micro-ondas composta por camadas de metal e resistivas.



Fonte: [32].

A FSS condutora atua como um refletor para os sinais de WLAN 2.45GHz e permite a passagem para outros sinais fora dessa faixa, enquanto as características de absorção são garantidas pela FSS resistiva. O substrato utilizado foi FR4 de permissividade elétrica relativa 4,4, o ar foi usado como espaçador entre as camadas de FSS, que estão separadas por uma distância d . A resposta em frequência da estrutura pode ser vista na Figura 3.17.

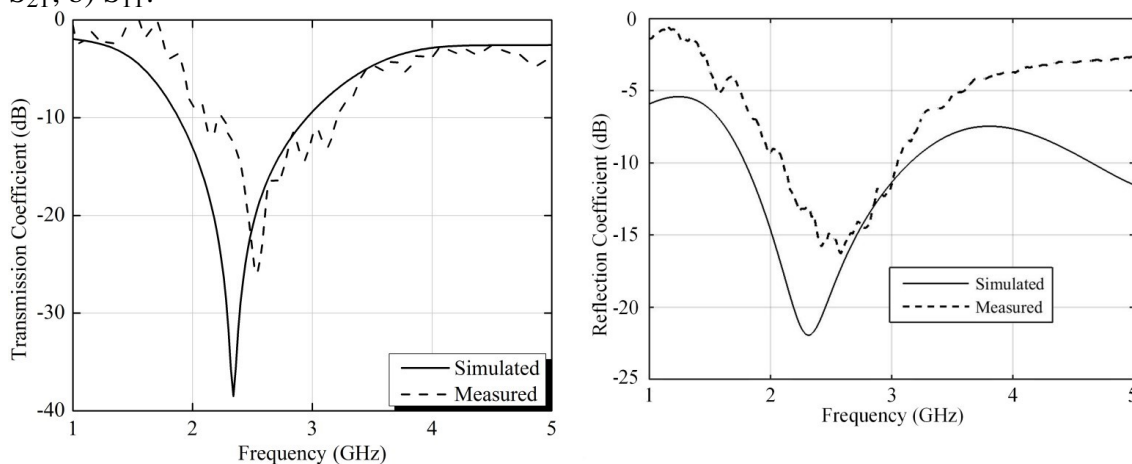
Figura 3.17: Parâmetros-S simulados para a estrutura absorve/transmite.



Fonte: [32].

A estrutura proposta em [32] foi fabricada e medida, a fim de confirmar que a substituição do plano de terra por uma FSS resultaria em ampliar a largura de banda do absorvedor de micro-ondas, além de confirmar que o uso da geometria escolhida garantiria estabilidade angular e independência de polarização, como pode ser visto na Figura 3.18.

Figura 3.18: Comparação entre os resultados simulados e medidos para o Parâmetro. a) S_{21} ; b) S_{11} .



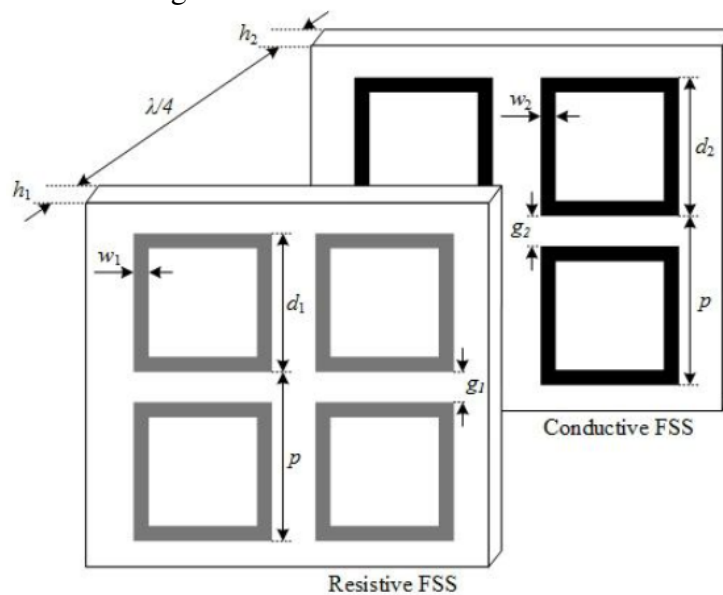
Fonte: [32].

No artigo [33] é proposta uma nova técnica para análise de superfícies seletivas em frequência do tipo absorve/transmite. Esta técnica surge da combinação de duas outras técnicas, o método do circuito equivalente e do método de análise da matriz de dispersão.

Outra contribuição importante nesse trabalho foi a modelagem da FSS resistiva usando o método do circuito equivalente, algo que não é muito difundido na literatura. A estrutura proposta consiste em duas FSS, sendo uma resistiva e outra condutora, ambas impressas em dielétrico de FR4 com permissividade elétrica relativa de 4,4 e com geometria da célula unitária de espira quadrada, como pode ser visto na Figura 3.19. Para a camada resistiva foi usado um substrato de Nelco4000 com espessura de 0,254mm apoiado por um substrato de FR4 e a resistência superficial das espiras quadradas resistivas foi definida igual a $R_s = 50 \Omega / \square$.

Reforçou-se a substituição do plano de terra pela utilização de uma FSS resistiva pelo fato de que o plano de terra iria refletir todas as frequências fora da faixa de absorção, o que causaria um aumento significativo nos múltiplos percursos na vizinhança. A utilização da FSS resistiva minimiza a atenuação de sinais fora da área de interesse. A técnica proposta pode ser combinada com várias outras técnicas de inteligência computacional e otimização, porém é apresentada uma limitação: a periodicidade das estruturas resistiva e condutora precisa ser igual.

Figura 3.19: FSS absorve/transmite.



Fonte: [33].

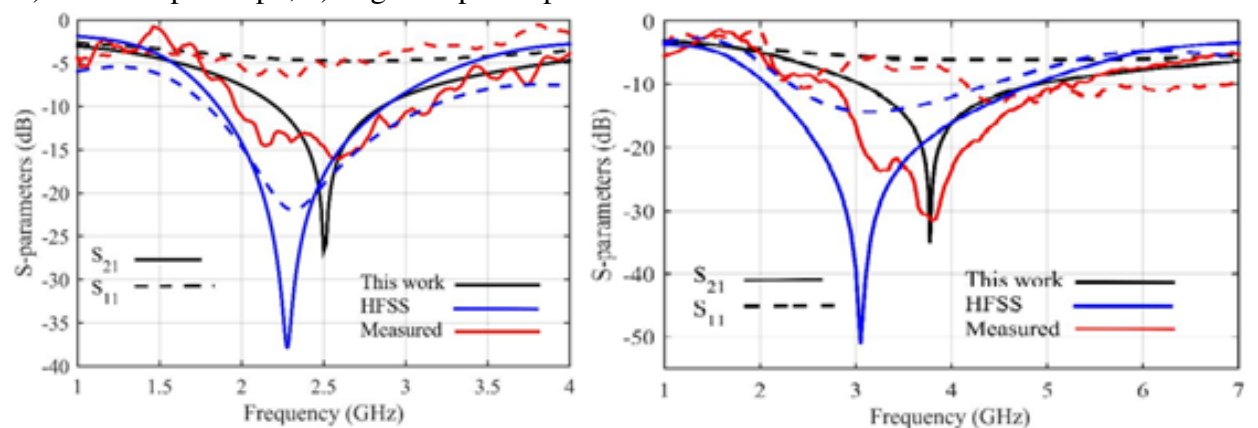
Para validar a técnica numérica proposta foram construídos e medidos dois protótipos de FSS de geometria de espira quadrada. O primeiro protótipo tem periodicidade $p = 42,5\text{mm}$, distância entre as duas camadas de FSS $d = 26,4\text{mm}$, cascadeadas usando espaçador de Teflon, espessura do substrato resistivo $h_1 = 1,854\text{mm}$, espessura do substrato condutor $h_2 = 1,6\text{mm}$. FSS resistiva de dimensões: $w_2 = 2\text{mm}$ e $d_2 = 31,95\text{mm}$, enquanto a FSS condutora de dimensões: $w_1 = 4\text{mm}$ e $d_1 = 33,95\text{mm}$.

O segundo protótipo tem periodicidade $p = 24\text{mm}$, distância entre as duas camadas de FSS $d = 14\text{mm}$, cascadeadas usando espaçador de acrílico, espessura do substrato resistivo $h_1 = 1,97\text{mm}$, espessura do substrato condutor $h_2 = 1,54\text{mm}$. FSS resistiva de dimensões:

$w_2 = 2,2\text{mm}$ e $d_2 = 21,5\text{mm}$, enquanto a FSS condutora de dimensões: $w_1 = 3\text{mm}$ e $d_1 = 21,5\text{mm}$.

Na Figura 3.20, pode ser vista a comparação entre os resultados simulados e medidos para os parâmetros-S com incidência normal. Foi observado que para ambos os casos, a técnica proposta obteve melhores resultados em termos de frequência de ressonância e para o Parâmetro S_{11} em relação aos apresentados utilizando o HFSS, porém em termos de largura de banda, os resultados obtidos pelo HFSS apresentaram uma melhor concordância. Logo, o modelo é validado mesmo com divergências em relação aos resultados obtidos usando modelo de onda completa, além de apresentar baixo custo computacional, podendo ser combinado com técnicas de otimização.

Figura 3.20: Comparação entre os resultados simulados e medidos para os parâmetros-S. a) Primeiro protótipo; b) Segundo protótipo.



Fonte: [33].

Pode-se observar que diversas estruturas de absorvedores multicamada utilizando FSS estão sendo propostas na literatura. O principal objetivo para utilizar essas estruturas é operar em uma ampla faixa, com independência de polarização e com estabilidade angular, porém essas estruturas estão utilizando um plano de terra, a utilização desse plano de terra piora o problema dos múltiplos percursos na vizinhança do absorvedor. A utilização de múltiplas camadas está começando a aparecer, visto que mesmo aumentando as dimensões físicas do absorvedor, proporciona uma maior largura de banda total, possibilitando até uma absorção em mais de uma faixa de operação. O estado da arte levantado nesse trabalho reforça essa ideia, trazendo também alguns pontos interessantes sobre FSS do tipo absorve/transmite. Diante disso, este trabalho pretende discutir as seguintes perguntas:

- Quais as principais propostas da literatura para obtenção de absorvedores banda larga?
- Estruturas usando FSS absorve/transmite têm sido usadas para obtenção de resposta banda larga?
- Quais desvantagens das FSS absorve/transmite devem ser minimizadas?
- Qual estrutura é mais apropriada para conseguir uma resposta absorve/transmite banda larga?

Capítulo 4

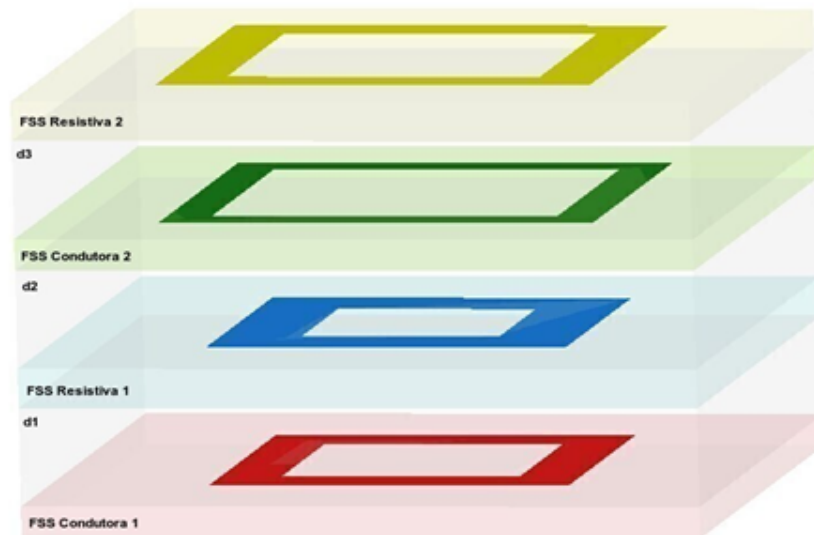
RESULTADOS

Nesse capítulo, são propostos absorvedores, seus resultados simulados são apresentados e analisados, análises paramétricas e comparação entre Estruturas foram utilizadas para avaliar a melhor Estrutura do absorvedor multicamadas para operar na faixa entre 2GHz e 6GHz. As Estruturas foram simuladas utilizando um *software* comercial e os gráficos foram gerados utilizando o *Matlab* versão R2016A. Ao todo foram simuladas 6 Estruturas diferentes com o objetivo de analisar os efeitos gerados com a mudança de posição das camadas de FSSs resistiva e condutora.

4.1 Estruturas 1 e 2

As Estruturas 1 e 2 são compostas por 2 absorvedores cascadeado. A Estrutura 1 pode ser vista na Figura 4.1, sendo o absorvedor composto por uma camada de FSS condutora na parte inferior, com geometria de espira quadrada, o material dielétrico é FR4 com espessura de 1,6mm e permissividade dielétrica de 4,4 , separadas por uma camada de ar da FSS resistiva na parte superior, com geometria de espira quadrada. Nas camadas de FSS resistiva foram utilizados o FR4 com resistência superficial de $50 \Omega / \square$ e uma espessura de 2mm. Todas as camadas de FSS (resistivas e condutoras) têm a mesma periodicidade da célula unitária de 24mm.

Figura 4.1: Estrutura 1 - composta pelo absorvedor 1 (FSS Condutora 1, camada de ar de espessura d_1 e FSS Resistiva 1) separado do absorvedor 2(FSS Condutora 2, camada de ar de espessura d_3 e FSS Resistiva 2) por uma camada de ar de espessura d_2 .



Fonte: Autoria própria.

A Estrutura 2 foi obtida invertendo a ordem dos absorvedores,. Essa modificação foi realizada para estudar como a resposta em frequência pode ser alterada pela simples mudança na ordem das camadas de um absorvedor. A Estrutura 2 pode ser vista na Figura 4.2.

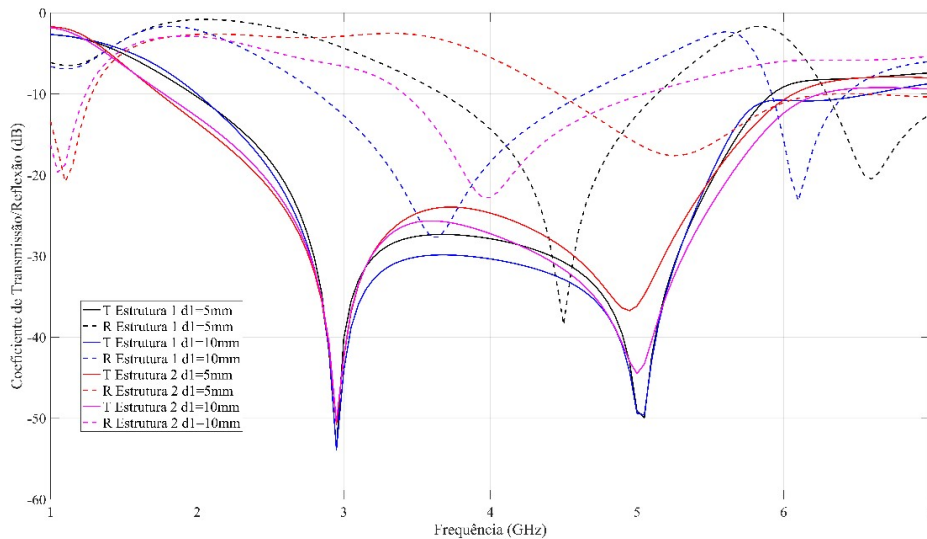
Figura 4.2: Estrutura 1 - composta pelo absorvedor 2 (FSS Condutora 2, camada de ar de espessura d_1 e FSS Resistiva 2) separado do absorvedor 1(FSS Condutora 1, camada de ar de espessura d_3 e FSS Resistiva 1) por uma camada de ar de espessura d_2 .



Fonte: Autoria própria.

Com o objetivo de comparar as Estruturas, foram feitas simulações utilizando os mesmos valores de d_1 , d_2 e d_3 , e foram obtidos os coeficientes de transmissão e reflexão como pode ser visto na Figura 4.3. Observou-se que para os mesmos valores de d_1 , d_2 e d_3 , apenas a Estrutura 2 para um valor de $d_2=10\text{mm}$ conseguiu cobrir totalmente a faixa de transmissão entre 2GHz e 6GHz, além de operar abaixo de 3dB do coeficiente de reflexão durante toda a faixa de absorção. Outro fator a ser observado é a variação da frequência central de reflexão, apenas mudando a ordem dos absorvedores, obteve-se uma mudança muito significativa do Coeficiente de Reflexão.

Figura 4.3: Coeficientes de transmissão e reflexão em dB para as Estruturas 1 e 2 para valores de $d_2=20\text{mm}$ e $d_3=20\text{mm}$.



Fonte: Autoria própria.

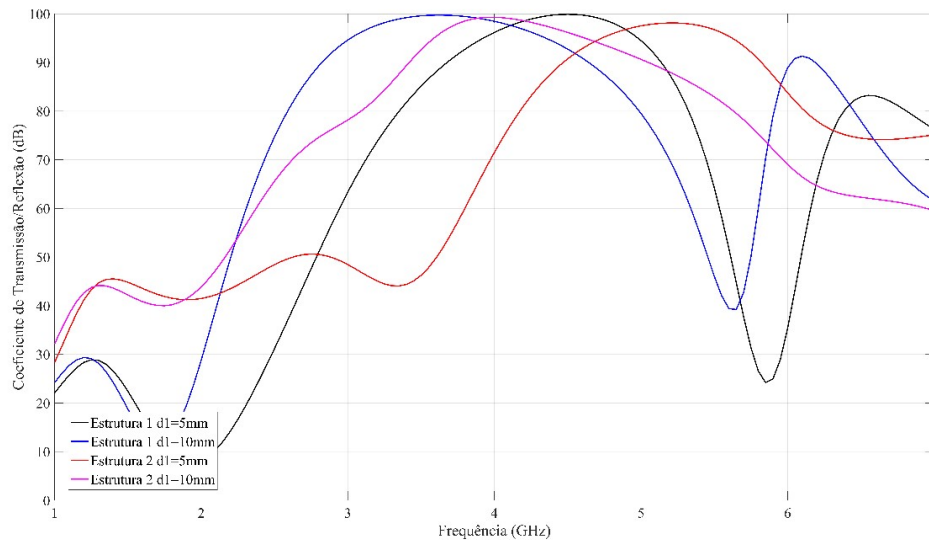
Com o objetivo de entender e comparar a absorção das Estruturas, foi utilizado o gráfico do coeficiente de absorção, como pode ser visto na Figura 4.4. O coeficiente de absorção pode ser definido como:

$$A(\omega) = 1 - T(\omega) - R(\omega) \quad (4.1)$$

em que $T(\omega)$ e $R(\omega)$ podem ser definidos como os coeficientes de transmissão e reflexão, respectivamente. (4.1) pode ser reescrita como:

$$A(\omega) = 1 - |S_{21}(\omega)|^2 - |S_{11}(\omega)|^2 \quad (4.2)$$

Figura 4.4: Coeficiente de absorção para as Estruturas 1 e 2 para valores de $d_2=20\text{mm}$ e $d_3=20\text{mm}$ e d_1 variando.



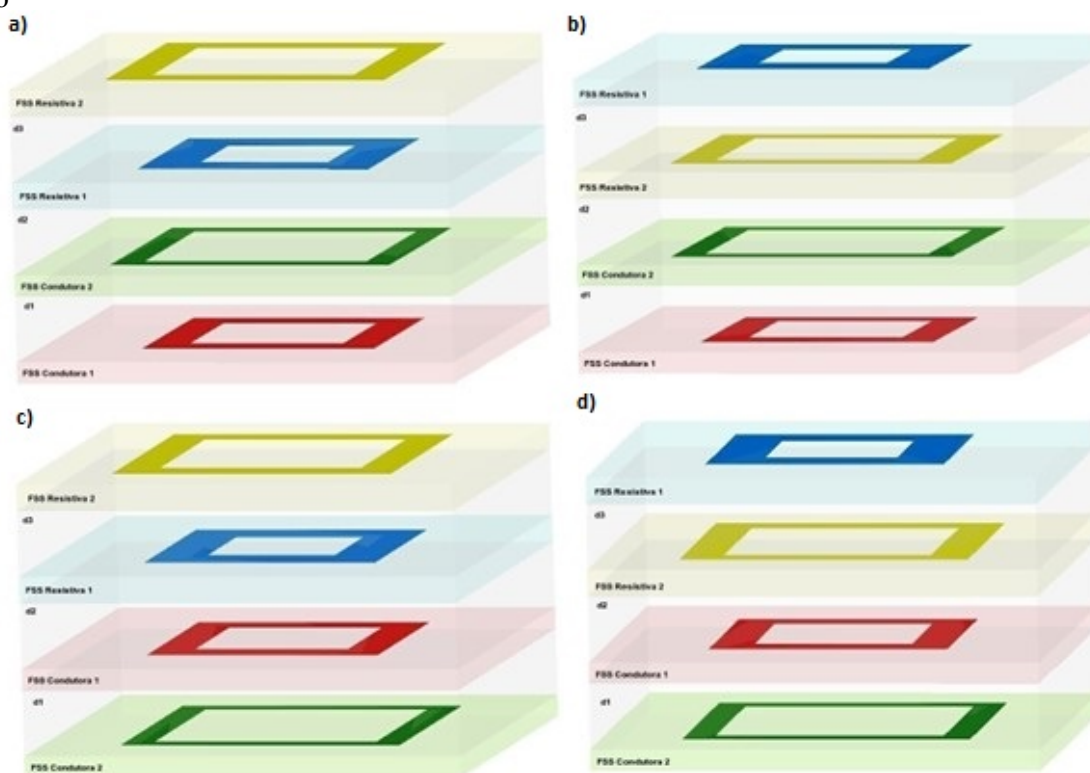
Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que o coeficiente de absorção mantém um alto valor dentro da faixa de frequência entre 2GHz e 6GHz, enquanto que para a Estrutura 1, os valores do coeficiente de absorção estão com valores muito baixos para a frequência de operação inicial de 2GHz e para frequência de operação próxima a 6GHz, logo essa Estrutura seria mais adequada para aplicações entre 3GHz e 5GHz, pois nesse intervalo o valor do coeficiente de absorção está acima de 60%.

4.2 Estruturas 3, 4, 5 E 6

Nessa etapa foram separadas as camadas de FSS e simuladas Estruturas cascadeando duas FSS condutoras nas camadas inferiores e duas camadas de FSS resistiva nas camadas superiores, todas as camadas foram separadas por camadas de ar, com espessura d_1 , d_2 e d_3 . A escolha de deixar duas camadas inferiores de FSS condutora e as camadas superiores de FSS resistiva se deu através de uma modificação do Absorvedor de Jaumann adicionando uma camada condutora adicional para aumentar a largura de banda de transmissão, visto que a FSS Condutora 1 foi projetada para operar na faixa de frequência entre 2GHz e 4 GHz, enquanto que a FSS Condutora 2 foi projetada para operar na faixa de frequência entre 4GHz e 6GHz. Ao utilizar essas duas camadas de forma cascadeada foi alcançado um aumento significativo na largura de banda de transmissão. De forma semelhante utilizou-se as FSS resistivas 1 e 2 como superfície resistiva (Absorvedor de Jaumann) para ampliar a largura de banda da reflexão. A FSS Resistiva 1 foi projetada para operar na faixa de frequência entre 2GHz e 4 GHz, enquanto que a FSS Resistiva 2 foi projetada para operar na faixa de frequência entre 4GHz e 6GHz. Na Figura 4.5 pode ser visto a composição das Estruturas 3,4,5 e 6.

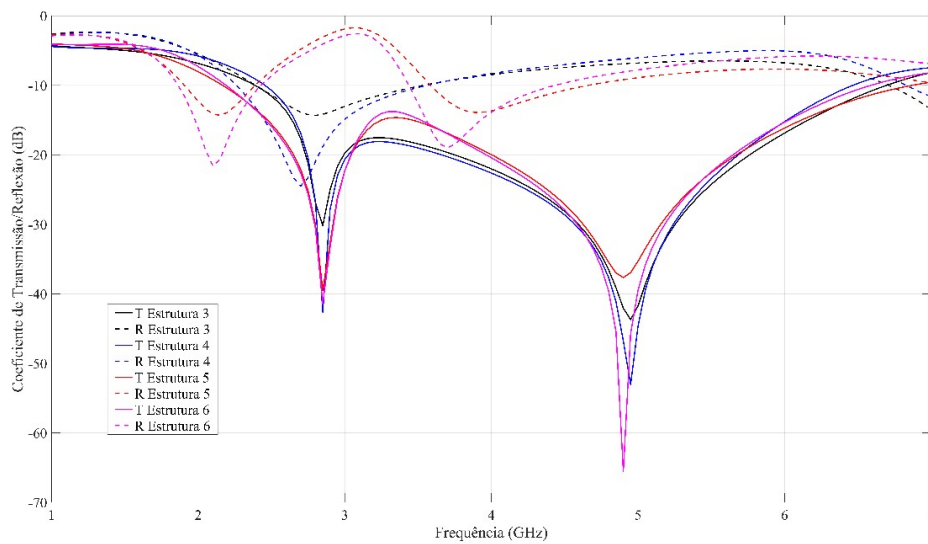
Figura 4.5: Estruturas simuladas, a) Estrutura 3; b) Estrutura 4; c) Estrutura 5; d) Estrutura 6



Fonte: Autoria própria.

Simulou-se a Estrutura para diferentes valores de d_1 , d_2 e d_3 , variando entre 5mm, 10mm, 15mm e 20mm. A Figura 4.6 mostra uma comparação entre as respostas em frequência das Estruturas para $d_1 = d_2 = d_3 = 5\text{mm}$. O coeficiente de transmissão variou pouco com a mudança na ordem das camadas resistivas e condutoras, porém o coeficiente de reflexão mudou de forma muito significativa. As Estruturas 5 e 6 não mantiveram o coeficiente de reflexão abaixo de 5dB durante a faixa de operação entre 2GHz e 6GHz, o que provoca um problema de absorção, enquanto que as Estruturas 3 e 4 apresentaram uma boa resposta quanto ao coeficiente de reflexão nessa faixa de operação, mostrando que a ordem das camadas causa um grande impacto na resposta em frequência do absorvedor.

Figura 4.6: Coeficientes de transmissão e reflexão(dB) para as Estruturas 3,4,5 e 6.

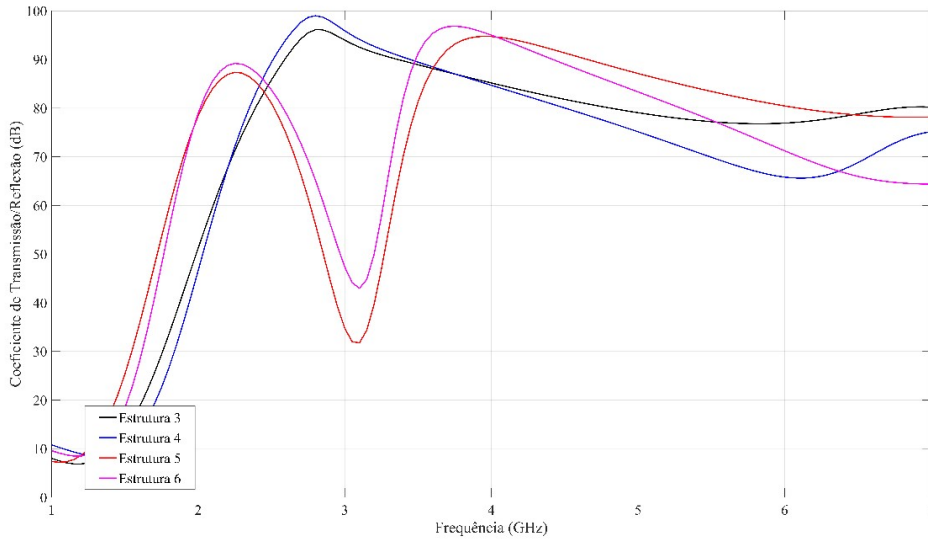


Fonte: Autoria própria.

Para melhor analisar essas Estruturas, foram comparados os coeficientes de absorção dessas Estruturas, como pode ser visto na Figura 4.7, a variação do coeficiente de reflexão no ponto de frequência 2,8GHz afetou de forma significativa o valor do coeficiente de absorção na faixa de operação das Estruturas 5 e 6, enquanto que as Estruturas 3 e 4 apresentam boa absorção dentro da faixa de frequência entre 2GHz e 6GHz, apresentando um valor superior a 60% de absorção em grande parte desse intervalo de frequência.

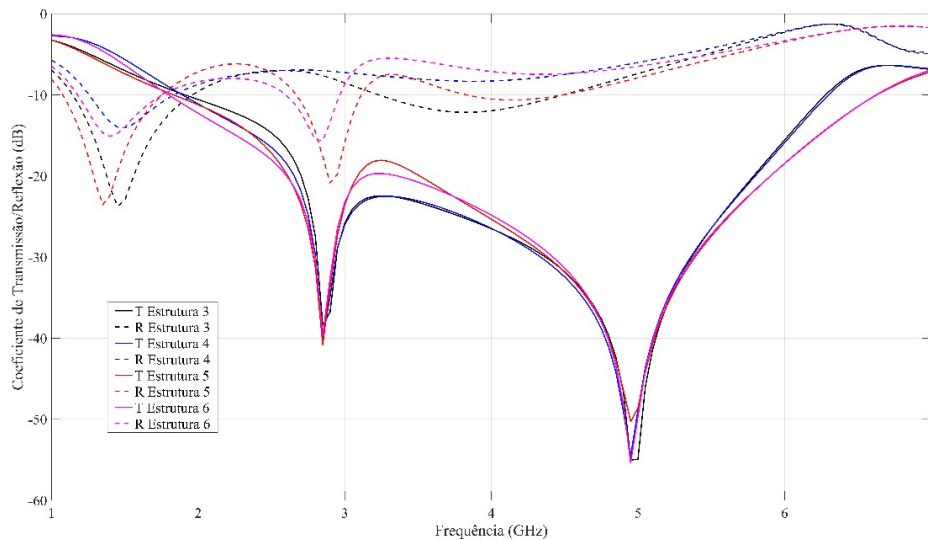
Foi realizada a mesma comparação entre Estruturas para diferentes valores de espessura das camadas de ar, são eles $d_1 = 20\text{mm}$, $d_2 = 15\text{mm}$ e $d_3 = 5\text{mm}$. A Figura 4.8 mostra os coeficientes de transmissão e reflexão das Estruturas. As Estruturas 5 e 6 apresentaram uma maior largura de banda de transmissão e o valor do coeficiente de reflexão esteve abaixo de -3dB para toda faixa de operação entre 2GHz e 6GHz, enquanto que para as Estruturas 3 e 4 a largura de banda de reflexão para -3dB foi um pouco menor do que o esperado, assim inviabilizando a aplicação dessas Estruturas como absorvedor para a aplicação proposta.

Figura 4.7: Coeficiente de Absorção para as Estruturas 3,4,5 e 6, para $d_1=5\text{mm}$, $d_2=5\text{mm}$ e $d_3=5\text{mm}$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.8: Coeficientes de Transmissão e Reflexão (dB) para as Estruturas 3,4,5 e 6, para $d_1=20\text{mm}$, $d_2=15\text{mm}$ e $d_3=5\text{mm}$.

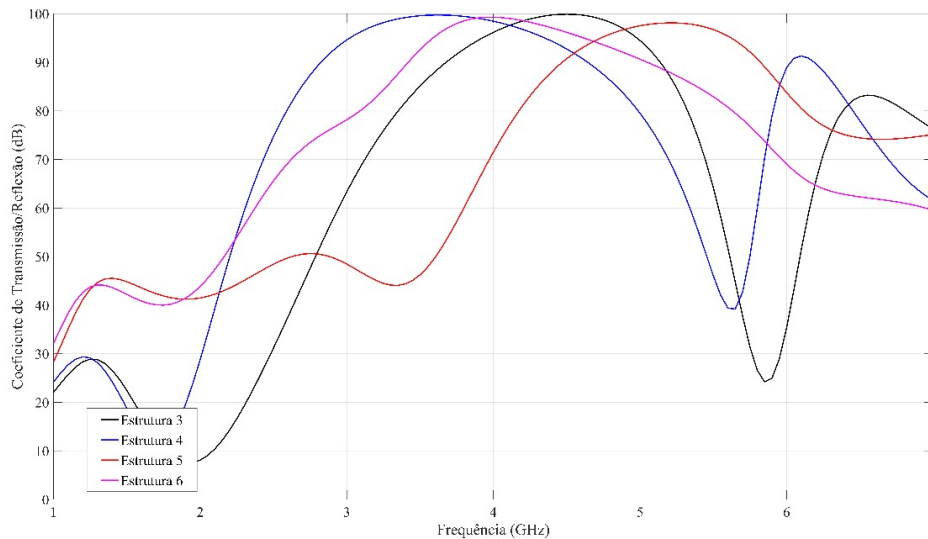


Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.9 mostra que as Estruturas 3 e 4 apresentaram baixos valores de absorção no final da faixa de operação da Estrutura, devido ao valor do coeficiente de reflexão ser alto nessa faixa de frequência, enquanto que para as Estruturas 5 e 6 foi observado um

coeficiente de absorção acima de 50% em toda faixa de operação do absorvedor, atingindo valores superiores a 75% em grande parte desse intervalo.

Figura 4.9: Coeficiente de Absorção para as Estruturas 3,4,5 e 6, para $d_1=20\text{mm}$, $d_2=15\text{mm}$ e $d_3=5\text{mm}$.



Fonte: Autoria própria.

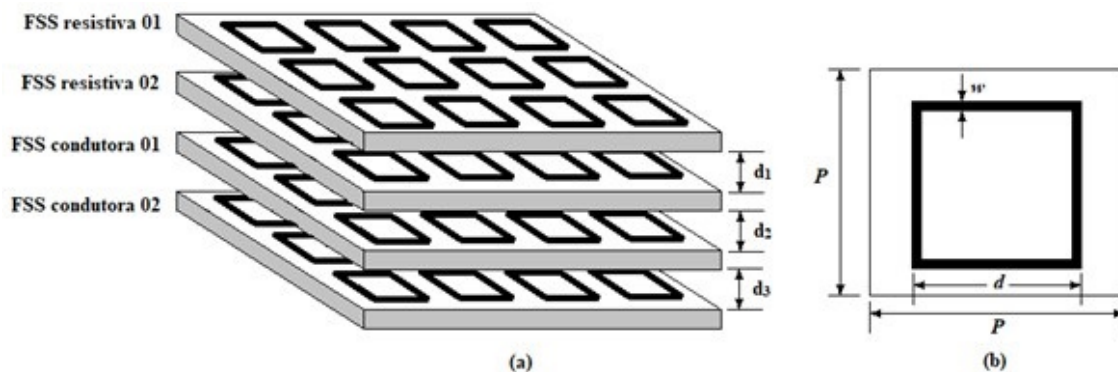
Observou-se então que ao variar as espessuras das camadas de ar a resposta em frequência das Estruturas muda significativamente, fazendo com que as Estruturas apresentem uma melhor ou pior absorção para a faixa de frequência da aplicação proposta (2GHz até 6GHz). Considerando que as duas funções desse absorvedor são de absorver os sinais desejados dentro dessa faixa de frequência, enquanto permite a passagem dos sinais fora dessa faixa de operação, então as Estruturas 5 e 6, para os valores de distância d_1 , d_2 e d_3 , 20mm, 15mm e 5mm respectivamente, apresentam um resultado satisfatório para essa aplicação.

4.3 Resultados e Discussões para a Estrutura Proposta

Após essa análise paramétrica, foi possível escolher a Estrutura adequada, para se obter a resposta em frequência desejada. Assim, serão utilizadas duas FSS resistivas e duas condutoras, todas compostas por células unitárias que utilizam espiras quadradas simples. A utilização de duas camadas resistivas e duas condutoras justifica-se pelo fato de se obter maior precisão de ajuste na resposta em frequência da Estrutura. Além disso, a espira quadrada é conhecida por sua estabilidade angular e independência de polarização. A Figura 4.10(a) ilustra o absorvedor proposto e a Figura 4.10(b) ilustra a geometria das células unitárias utilizadas nas camadas. As camadas metálicas utilizam como substrato FR-4, com espessura h_1 de 1,6 mm, constante dielétrica de 4,4 e tangente de perda de 0,02. Por outro lado, as camadas resistivas têm uma resistência superficial de $50 \Omega /$

□, FR-4 como substrato com espessura h_2 de 2,0 mm. As células unitárias de ambas as FSS têm uma periodicidade P de 24 mm. A primeira FSS condutora possui espiras com dimensões $d_{c1} = 17,8$ mm e $w_{c1} = 3$ mm. A segunda FSS condutora tem espiras com dimensões $d_{c2} = 21,5$ mm e $w_{c2} = 2,2$ mm. A primeira FSS resistiva possui espiras com dimensões $d_{r1} = 21,5$ mm e $w_{r1} = 4$ mm. Por fim, a segunda FSS resistiva possui espiras com dimensões $d_{r2} = 21,5$ mm e $w_{r2} = 3$ mm.

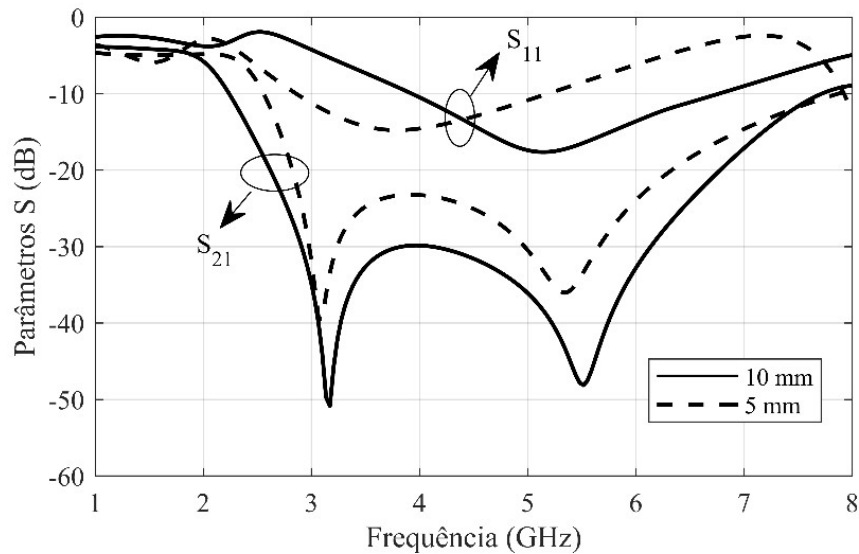
Figura 4.10: Absorvedor proposto: (a) Estrutura cascadeada e (b) geometria da célula unitária.



Fonte: Autoria própria.

Para se obter uma Estrutura mais compacta, investigou-se o efeito do espaçamento entre as FSS nos coeficientes de transmissão e reflexão sob incidência normal. A Figura 4.11 ilustra os parâmetros S para diferentes valores de espaçamento, d_1 e d_2 , para polarização vertical. Observa-se que o coeficiente de transmissão (S_{21}) apresenta variação pequena. Por outro lado, o coeficiente de reflexão (S_{11}) apresenta um deslocamento na banda de operação, passando de 3 a 5 GHz (para 5 mm) para 4 a 6,7 GHz (para 10 mm).

Figura 4.11: Parâmetros S para espaçamentos de 5 mm e 10 mm entre as FSS.

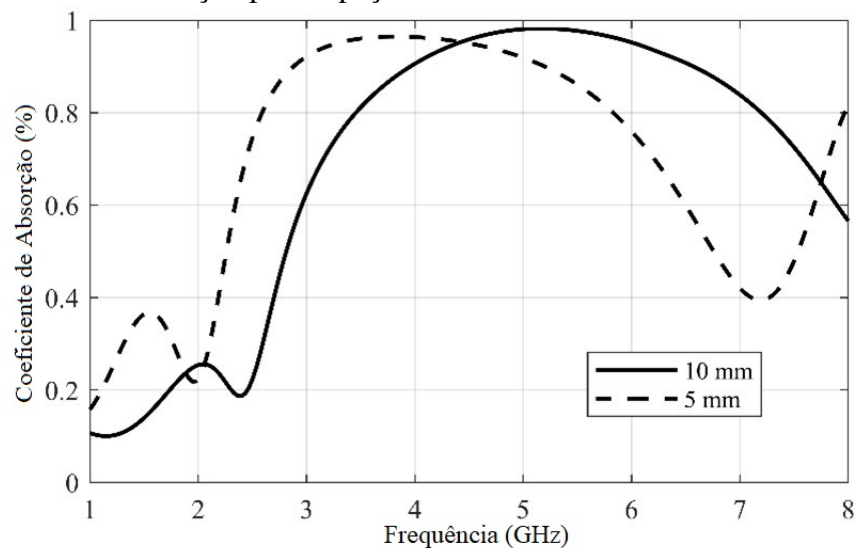


Fonte: Autoria própria.

Por fim, foi obtida a absorção utilizando a equação 4.1.

A partir da Figura 4.12, observa-se que para um espaçamento de 10 mm a absorção permanece acima de 80% para a faixa de frequência de 3,5 a 7,1 GHz, enquanto que para o espaçamento de 5 mm, a absorção foi alterada para 2,5 a 5,9 GHz, o que atende a requisitos para as bandas ISM, 5G a 3,5 GHz e UNII.

Figura 4.12: Absorção para espaçamentos de 5 mm e 10 mm entre as FSS.

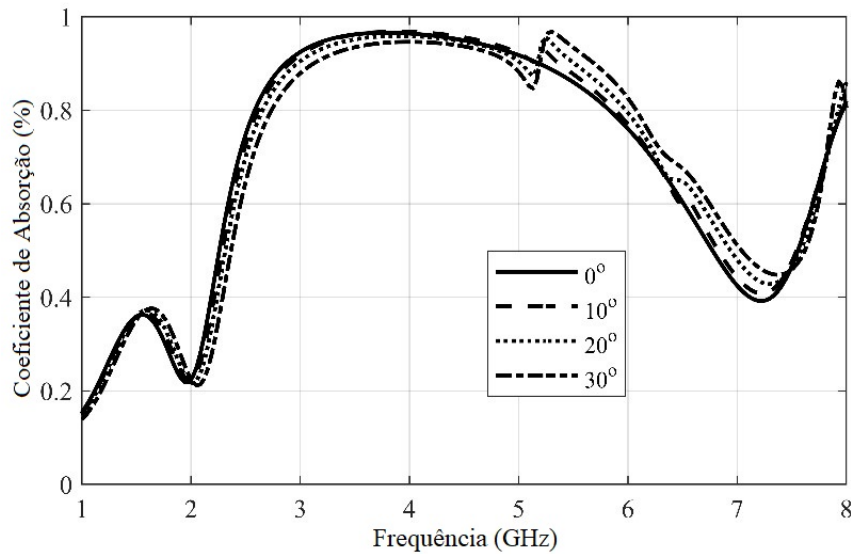


Fonte: Autoria própria.

Para investigar a estabilidade angular e independência de polarização, a Estrutura foi analisada sob incidência oblíqua até 30°. A Figura 4.13 ilustra os resultados para variação angular e polarização vertical. Como pode ser visto, a banda de absorção de interesse

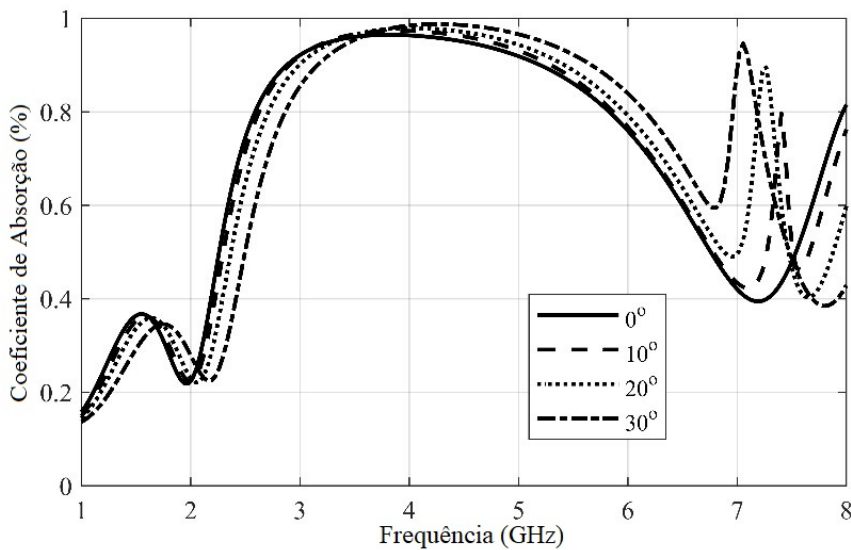
permanece praticamente inalterada, garantindo a absorção das frequências de interesse. Para polarização horizontal, pode-se ver que uma segunda banda de absorção estreita aparece a partir de 20° , mas a banda de absorção de interesse é quase a mesma (ver Figura 4.14). Além disso, a segunda banda de absorção é em torno de 7 GHz, o que não afeta a maioria das aplicações *indoor*.

Figura 4.13: Absorção sob incidência normal e incidência oblíqua para polarização vertical.



Fonte: Autoria própria.

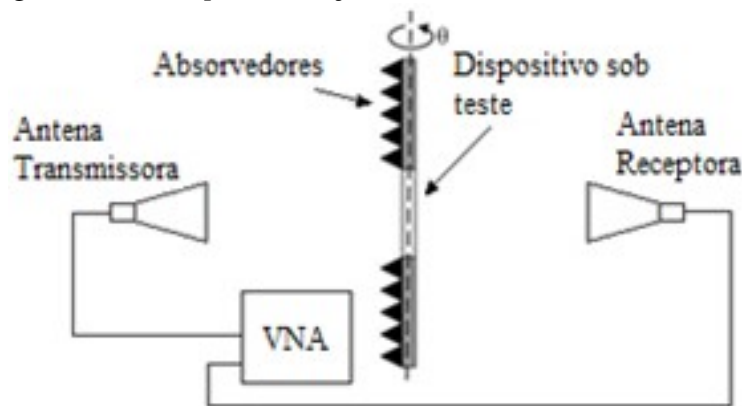
Figura 4.14: Absorção sob incidência normal e incidência oblíqua para polarização horizontal.



Fonte: Autoria própria.

A fim de validar as simulações feitas nesta tese, um protótipo de absorvedor banda larga com FSS foi construído. Para medição de incidência normal, os lados do transmissor e do receptor foram conectados a duas antenas corneta de banda ultralarga idênticas. As antenas foram colocadas a uma distância de 1,30 m até o centro da Estrutura. A resposta em frequência do protótipo foi medida usando um analisador vetorial de rede (VNA) conectado diretamente às antenas transmissoras e receptoras. Os equipamentos utilizados foram: duas antenas corneta de 700 MHz a 18 GHz modelo SAS-571, com tripés de madeira, um analisador vetorial de rede da *Agilent Technologies*, modelo N5230A, operando na faixa de 300 kHz a 13,5 GHz. Além disso, uma Estrutura foi usada para suportar o absorvedor e tem em um lado absorvedores de RF e folha condutora. Com este suporte, reduz-se o ruído causado pela contaminação por difração. Os coeficientes de reflexão e transmissão foram medidos. Para o coeficiente de transmissão foi usada uma configuração tradicional, conforme ilustrado na Figura 4.15.

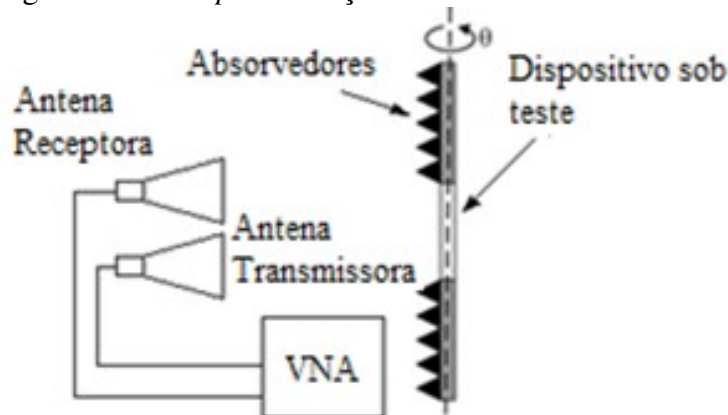
Figura 4.15: *Setup* de medição do coeficiente de transmissão.



Fonte: Autoria própria.

Para o coeficiente de reflexão foi usado o ajuste mostrado na Figura 4.16. Este tipo de configuração limita as medidas de incidência angular.

Figura 4.16: *Setup* de medição do coeficiente de reflexão.



Fonte: Autoria própria.

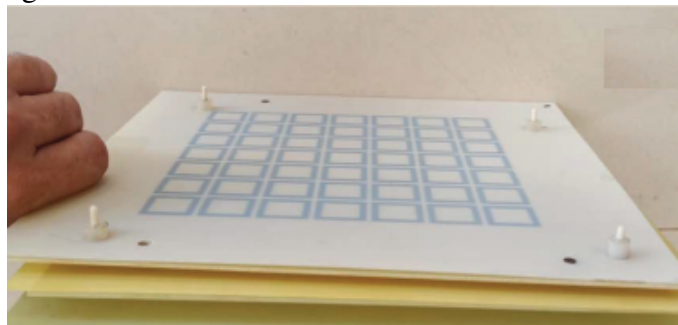
A Figura 4.17 ilustra fotos das medições do coeficiente de transmissão e do coeficiente de reflexão. A Figura 4.18 Ilustra o absorvedor construído e montado.

Figura 4.17: Fotos do *setup* de medição.



Fonte: Autoria própria.

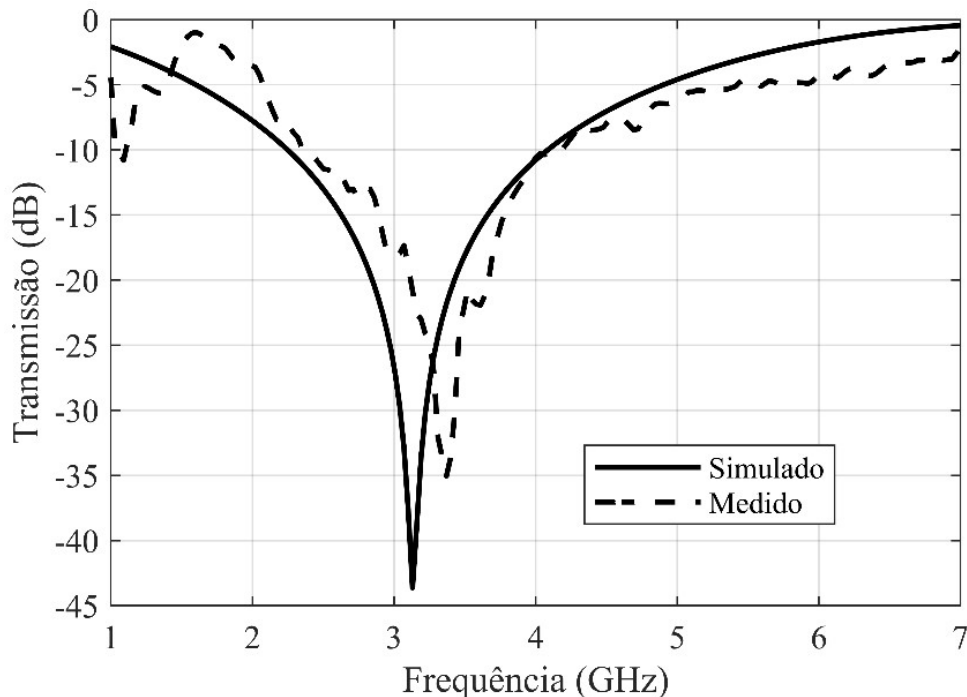
Figura 4.18: Foto do absorvedor construído e montado.



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, foram medidos os coeficientes de transmissão das FSS condutoras propostas, para validar o projeto e verificar se as respostas em frequência concordavam. Na Figura 4.19, pode-se ver a comparação entre os resultados simulados e medidos, para a FSS condutora 01, que foi projetada para operar na faixa de frequência de 2 a 4 GHz. Os resultados simulados mostram que a frequência de ressonância ocorre em 3,13 GHz e a banda de rejeição de -10 dB vai de 2,13 GHz a 4,07 GHz. Os resultados medidos mostram que a frequência de ressonância ocorre em 3,37 GHz e a banda de rejeição de -10 dB vai de 2,36 GHz a 4,18 GHz. Há uma boa concordância entre os resultados, mostrando a viabilidade da Estrutura. Já na Figura 4.20 tem-se a comparação entre os resultados simulados e medidos para a segunda FSS condutora, projetada para bloquear sinais na faixa de frequência de 4,5 a 6,5 GHz. Os resultados simulados mostram que a frequência de ressonância ocorre em 5,62 GHz (5,68 GHz nas medições) e a banda de rejeição de -10 dB vai de 4,48 GHz a 6,55 GHz (3,72 GHz a 6,55 GHz nas medições). Como pode ser observado, os resultados também mostram boa concordância, o que demonstra a viabilidade do projeto da segunda FSS condutora.

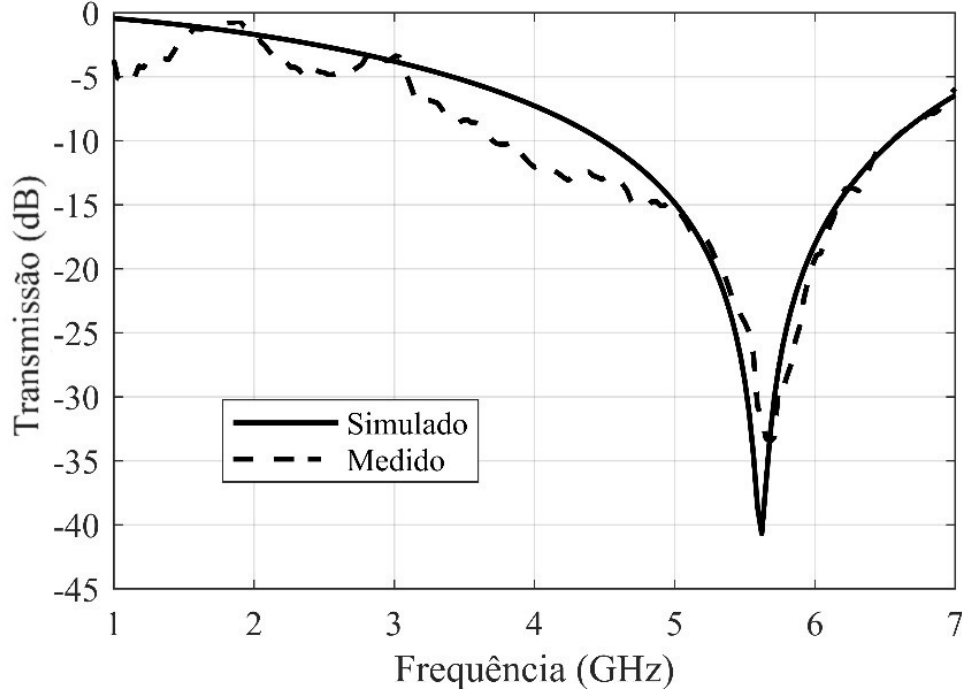
Figura 4.19: Comparação entre resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão das FSSs condutora 01.



Fonte: Autoria própria.

Após essas medições, foram feitas medições da Estrutura absorvedora, para comprovar se a banda desejada tinha sido atendida, em termos de coeficiente de transmissão, de coeficiente de reflexão e de absorção. A banda pretendida era de 2,5 a 6,5 GHz, sendo que pelo menos 80% de absorção deveria ocorrer em toda a banda e os coeficientes de transmissão e de reflexão deveriam ficar abaixo de -10 dB em toda a banda. A Figura 4.21, ilustra a comparação entre os resultados simulados e medidos, para o coeficiente de

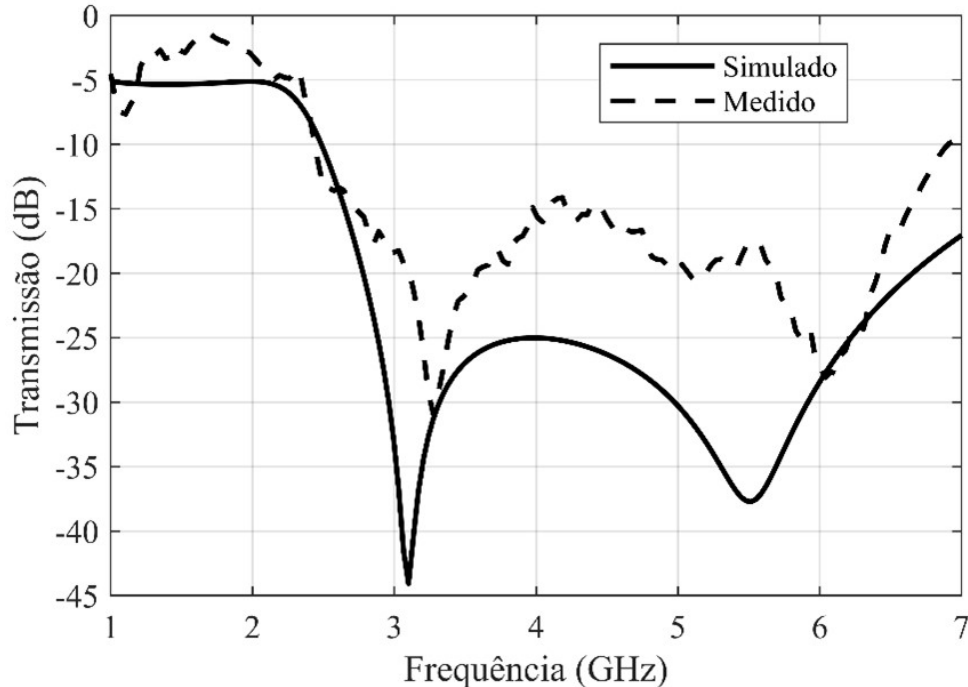
Figura 4.20: Comparação entre resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão das FSSs condutora 02.



Fonte: Autoria própria.

transmissão da Estrutura absorvedora. Os resultados simulados mostram que a banda de rejeição vai de 2,48 GHz a 7,00 GHz. Já os resultados medidos mostram que a banda de rejeição vai de 2,44 GHz a 6,92 GHz, sendo esse valor considerado para -10 dB. Esses resultados apresentam uma boa concordância entre si, demonstrando que o projeto atende a banda pretendida, em termos de coeficiente de transmissão. Em termos de coeficiente de reflexão (Figura 4.22), os resultados simulados mostram que a banda de rejeição vai de 3,94 GHz a 6,60 GHz. Já os resultados medidos mostram que a banda de rejeição vai de 2,89 GHz a 5,98 GHz, sendo esse valor também considerado para -10 dB. Esses resultados apresentam uma boa concordância entre si, demonstrando que o projeto fica muito próximo de atender a banda pretendida, em termos de coeficiente de reflexão.

Figura 4.21: Comparação entre resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão do absorvedor.

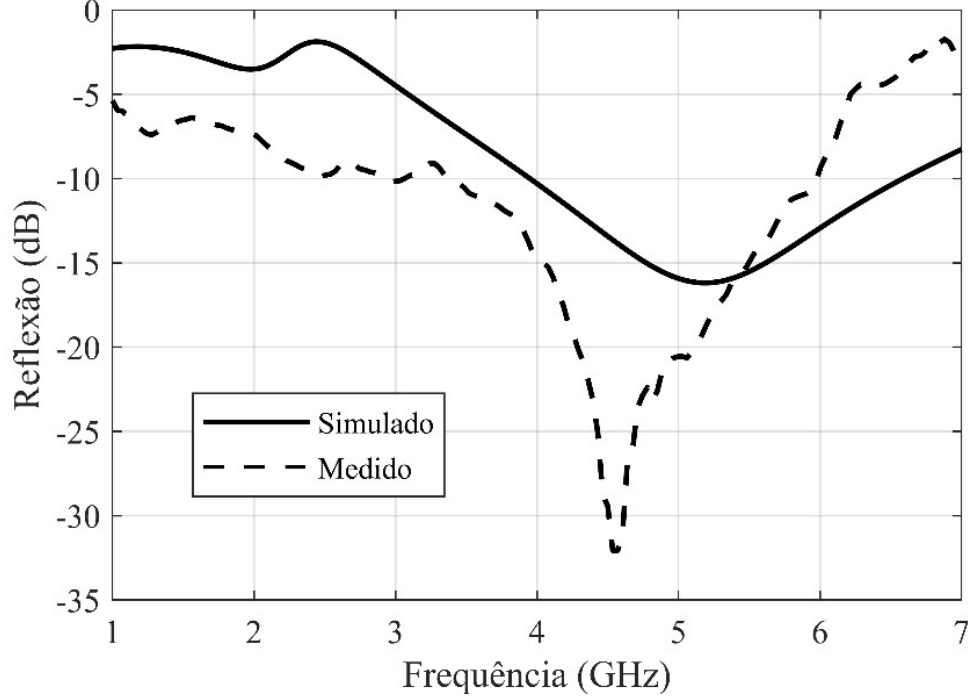


Fonte: Autoria própria.

Para o caso da absorção, ilustrada na Figura 4.23, foi considerado um valor de 80% em toda a banda. Nesse caso, os resultados simulados mostram que a banda de absorção vai de 3,42 GHz a 7,16 GHz. Já os resultados medidos mostram que a banda de absorção vai de 2,48 GHz a 6,13 GHz. Esses resultados apresentam uma boa concordância entre si, demonstrando que o projeto fica, considerando a absorção, muito próximo de atender a banda pretendida.

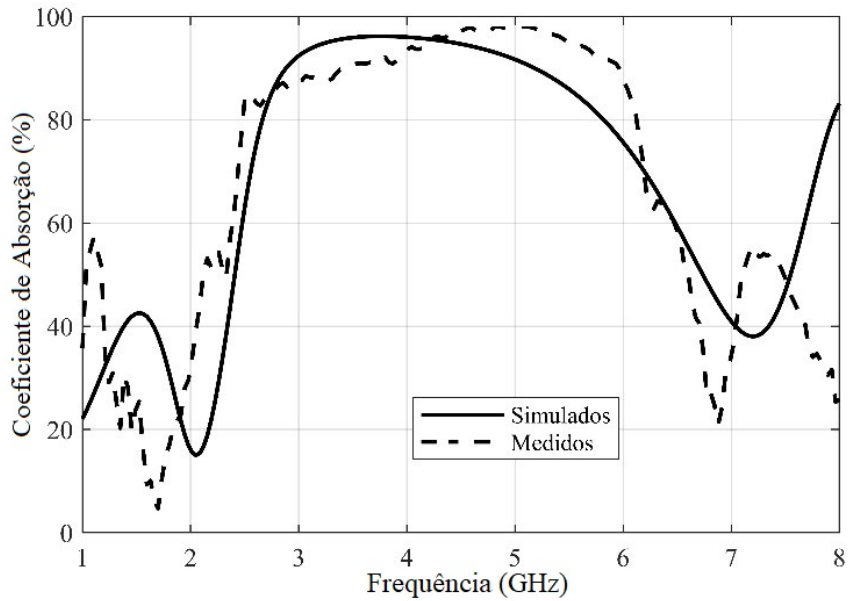
Com esses resultados, pode-se ver que a Estrutura proposta apresenta uma banda larga, podendo absorver inteiramente as faixas *ISM* (2,4 – 2,4835 GHz), *5G* (3,4 – 3,6 GHz) e *UNII* (5 – 6 GHz), sem bloquear as demais frequências, evitando múltiplos percursos, nas vizinhanças onde o absorvedor for instalado, o que não acontece com as Estruturas propostas na literatura.

Figura 4.22: Comparação entre resultados simulados e medidos do coeficiente de reflexão do absorvedor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.23: Comparação entre resultados simulados e medidos da absorção.



Fonte: Autoria própria.

Capítulo 5

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram apresentadas as superfícies seletivas em frequência, mostrando as principais definições sobre o tema e uma caracterização da resposta em frequência dessas estruturas. Trabalhos importantes na área foram referenciados e aplicações foram evidenciadas.

Absorvedores de ondas eletromagnéticas foram apresentados, explicando-se seu princípio de funcionamento e mostrando os principais estudos e aplicações desse tipo de estrutura.

O estado da arte sobre absorvedores de ondas eletromagnéticas usando FSSs condutoras e resistivas foi apresentado, mostrando-se diversos estudos encontrados na literatura, apresentando definições, vantagens e complexidades.

Uma análise paramétrica de absorvedores usando FSSs resistivas e condutoras foi desenvolvido, considerando-se seis diferentes estruturas e variações das dimensões físicas de todas elas.

Após a análise paramétrica, uma estrutura com duas FSSs resistivas e duas condutoras foi proposta, por apresentar a resposta em frequência desejada. As FSSs usaram como geometria das células unitárias a espira quadrada simples, que apresenta boa largura de banda, independência de polarização e estabilidade angular. Foi analisado o efeito do espaçamento entre as FSSs, para otimizar a resposta em frequência.

A partir do cascadeamento das quatro FSSs projetadas, foi possível obter um absorvedor seletivo em frequência do tipo banda larga. Isso, do conhecimento dos autores, é o primeiro absorvedor banda larga relatado sem um plano de terra completo e usando FSS. Os resultados numéricos mostram que o absorvedor proposto apresenta absorção com estabilidade angular até um ângulo de incidência de 30° .

Além disso, resultados numéricos e experimentais mostram que a estrutura proposta pode absorver sinais em uma faixa de frequência de 2,4 a 6,13 GHz. Os resultados medidos mostram boa concordância com os numéricos, com absorção acima de 80% em toda a faixa de frequência analisada.

A estrutura proposta pode absorver sinais para toda a banda ISM (2,4 – 2,4835 GHz), 5G a 3,5 GHz e UNII (5 – 6 GHz), sem bloquear as demais frequências, evitando múltiplos percursos nas proximidades onde o absorvedor está instalado, o que não acontece com as estruturas propostas na literatura.

Como trabalhos futuros, o autor indica um estudo mais aprofundado sobre a largura de banda que torne os resultados mais eficientes com relação a essa variável. Propõe-se

também um estudo sobre outras geometrias para a célula unitária. Métodos de inteligência computacional podem ser utilizados para otimização da resposta em frequência desejada.

Referências Bibliográficas

- [1] M. Gustafsson, A. Karlsson, A. Rebelo, and B. Widenberg, “Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 6, pp. 1897–1900, 2006.
- [2] F. Che Seman and R. Cahill, “Frequency selective surfaces based planar microwave absorber,” *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, pp. 906–909, 01 2012.
- [3] J. Bennett, B. Chambers, and G. Crossley, “Characterisation of microwave four-parameter materials and its application in wideband radar absorber design,” *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, pp. 337–340, December 1994.
- [4] C. R. Paul, *Introduction to electromagnetic compatibility*, vol. 184. John Wiley e Sons, 2006.
- [5] F. Marra, J. Lecini, A. Tamburrano, L. Pisu, and M. Sarto, “Electromagnetic wave absorption and structural properties of wide-band absorber made of graphene-printed glass-fibre composite,” *Scientific Reports*, vol. 8, 08 2018.
- [6] B. Chung and H.-T. Chuah, “Modeling of rf absorber for application in the design of anechoic chamber,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 18, pp. 81–82, 01 2004.
- [7] M. Basravi, M. Maddahali, Z. H. Firouzeh, and A. Ramezani, “Design of a novel ultra broadband single-layer absorber using double fractal square loops,” in *2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 621–625, 2016.
- [8] B. A. Munk, “Frequency selective surface: Theory and design,” 2000.
- [9] R. Fante and M. McCormack, “Reflection properties of the salisbury screen,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 10, pp. 1443–1454, 1988.
- [10] L. Du Toit and J. Cloete, “Electric screen jauman absorber design algorithms,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 12, pp. 2238–2245, 1996.
- [11] A. Kazem Zadeh and A. Karlsson, “Capacitive circuit method for fast and efficient design of wideband radar absorbers,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 8, pp. 2307–2314, 2009.

- [12] S. Chakravarty, R. Mittra, and N. Williams, "On the application of the microgenetic algorithm to the design of broad-band microwave absorbers comprising frequency-selective surfaces embedded in multilayered dielectric media," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 6, pp. 1050–1059, 2001.
- [13] S. Chakravarty, R. Mittra, and N. Williams, "Application of a microgenetic algorithm (mga) to the design of broadband microwave absorbers using multiple frequency selective surface screens buried in dielectrics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 3, pp. 284–296, 2002.
- [14] Y. Tayde, M. Saikia, K. V. Srivastava, and S. A. Ramakrishna, "Polarization-insensitive broadband multilayered absorber using screen printed patterns of resistive ink," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2489–2493, 2018.
- [15] S. Ghosh and K. V. Srivastava, "A polarization-independent broadband multilayer switchable absorber using active frequency selective surface," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 3147–3150, 2017.
- [16] E. P. d. Santos, *Desenvolvimento de uma técnica numérica para análise de superfícies seletivas em frequência do tipo absorve-transmite*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/28089>, 7 2019.
- [17] A. Varuna, S. Ghosh, H. Sheokand, and K. V. Srivastava, "A polarization-insensitive miniaturized element frequency selective surface using meander lines," in *2018 Twenty Fourth National Conference on Communications (NCC)*, pp. 1–4, 2018.
- [18] B. Döken and M. Kartal, "Dual layer convoluted frequency selective surface design in the 2.4 ghz and 5.8 ghz ism bands," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 33, pp. 413–418, 01 2018.
- [19] R. M. S. Cruz, P. H. da F. Silva, and A. G. d'Assunção, "Neuromodeling stop band properties of koch island patch elements for fss filter design," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, no. 12, pp. 3014–3019, 2009.
- [20] A. L. Pereira de Siqueira Campos, R. H. C. Maniçoba, and A. G. D'Assunção, "Investigation of Enhancement Band Using Double Screen Frequency Selective Surfaces with Koch Fractal Geometry at Millimeter Wave Range," *Journal of Infrared*, vol. 31, pp. 1503–1511, Dec. 2010.
- [21] E. Braz and A. Campos, "A new multifractal geometry for design of frequency selective surfaces with dual band response," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 30, pp. 799–803, 07 2015.
- [22] E. Braz and A. Campos, "Dual/wide band multifractal frequency selective surface for applications in s- and x-band," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, 10 2014.

- [23] T. Wu, "Frequency selective surfaces and grid arrays," 1995.
- [24] M. W. B. d. Silva, *Superfícies seletivas em frequência - FSS : concepção e projeto de absorvedores planares de micro-ondas para aplicação em WLAN, WIMAX e radar*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica, <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/261243>, 2014.
- [25] G. Kiani, A. Weily, and K. Esselle, "A novel absorb/transmit fss for secure indoor wireless networks with reduced multipath fading," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 16, no. 6, pp. 378–380, 2006.
- [26] W. S. Arceneaux, R. D. Akins, and W. B. May, "Absorptive/transmissive radome," Mar. 21 1995. US Patent 5,400,043.
- [27] Y. Tayde, M. Saikia, and K. V. Srivastava, "Double-layer polarization independent broadband absorber using resistive ink for c, x and ku bands application," in *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, pp. 1–4, 2018.
- [28] Y. He, W. Feng, S. Guo, J. Wei, Y. Zhang, Z. Huang, C. Li, L. Miao, and J. Jiang, "Design of a dual-band electromagnetic absorber with frequency selective surfaces," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 5, pp. 841–845, 2020.
- [29] R. Panwar, S. Puthucheri, V. Agarwala, and D. Singh, "Fractal frequency-selective surface embedded thin broadband microwave absorber coatings using heterogeneous composites," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 8, pp. 2438–2448, 2015.
- [30] L. Wang, S. Liu, X. Kong, X. Liu, and S. Sun, "Absorptive frequency selective surface with a high selective passband and two absorption bands," in *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, pp. 926–928, 2019.
- [31] J. Xia, J. Wei, Y. Liu, Y. Zhang, S. Guo, C. Li, S. Bie, and J. Jiang, "Design of a wideband absorption frequency selective absorber based on double lossy layers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 7, pp. 5718–5723, 2020.
- [32] T. Areias, R. Carvalho, M. Silva, L. Matos, J. J. G. P. Neto, A. Campos, and A. Gomes Neto, "Frequency selective surface microwave absorber for wlan applications," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 35, pp. 208–216, 01 2020.
- [33] E. P. dos Santos, A. L. P. S. Campos, A. Gomes Neto, and M. Silva, "Proposed technique of analysis for absorber/transmitter frequency selective surfaces," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications [online]*, vol. 20, pp. 435–444, June 2021.
- [34] A. Kazemzadeh, "Nonmagnetic ultrawideband absorber with optimal thickness," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 1, pp. 135–140, 2011.

- [35] B. A. Munk, P. Munk, and J. Pryor, “On designing jaumann and circuit analog absorbers (ca absorbers) for oblique angle of incidence,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 1, pp. 186–193, 2007.
- [36] S. Ghosh and K. V. Srivastava, “A polarization-independent broadband multilayer switchable absorber using active frequency selective surface,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 3147–3150, 2017.
- [37] G. Sen, M. Kumar, S. N. Islam, and S. Das, “Design of a polarization insensitive absorptive frequency selective surface for radome applications,” in *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, pp. 1–3, IEEE, 2018.