



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DA PARAÍBA
DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO DE ENSINO
COORDENAÇÃO DO CURSO SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

THALISSON DE SOUZA DA LUZ

ESTUDO DE SUPERFÍCIE SELETIVA EM FREQUÊNCIA COM ELEMENTOS 3D

JOÃO PESSOA – PB
ANO 2025

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

L979e Luz, Thalisson de Souza da.

Estudo de superfície seletiva em frequência com elementos 3D
/ Thalisson de Souza da Luz - 2025.

43 f. : il.

TCC (Graduação – Tecnologia em Sistemas de
Telecomunicações) – Instituto Federal da Paraíba – IFPB /
Coordenação de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Araújo Cavalcante.

1. Impressão 3D. 2. Caracterização Eletromagnética. 3. Dipolo
cruzado I. Título.

CDU 621.39

Bibliotecário responsável Thiago de Lima Silva – CRB15/524

THALISSON DE SOUZA DA LUZ

ESTUDO DE SUPERFÍCIE SELETIVA EM FREQUÊNCIA COM ELEMENTOS 3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Sistemas de Telecomunicações, do Instituto Federal da Paraíba – Campus João Pessoa, em cumprimento às exigências parciais para a obtenção do título Tecnólogo.

ORIENTADOR (A): GUSTAVO ARAUJO CAVALCANTE

**JOÃO PESSOA – PB
ANO 2025**

THALISSON DE SOUZA DA LUZ

ESTUDO DE SUPERFÍCIE SELETIVA EM FREQUÊNCIA COM ELEMENTOS 3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Sistemas de Telecomunicações, do Instituto Federal da Paraíba – Campus João Pessoa, em cumprimento às exigências parciais para a obtenção do título Tecnólogo.

Aprovada em 18/08/2025

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **GUSTAVO ARAUJO CAVALCANTE**
Data: 11/09/2025 11:36:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gustavo Araujo Cavalcante
Orientador (IFPB)

Documento assinado digitalmente
 **ADAILDO GOMES D ASSUNCAO JUNIOR**
Data: 11/09/2025 11:43:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção Junior
Examinador

Documento assinado digitalmente
 **LINCOLN MACHADO DE ARAUJO**
Data: 12/09/2025 10:13:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lincoln Machado de Araújo
Examinador

Dedicatória

À Deus. À meus pais e familiares, por todo apoio e carinho!

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força e sabedoria durante toda essa jornada.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio incondicional, incentivo e carinho nos momentos mais desafiadores.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo Araujo Cavalcante, pela paciência, dedicação e orientação técnica, fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos professores e colegas do curso de Sistemas de Telecomunicações, pelo compartilhamento de conhecimentos e experiências ao longo dessa trajetória.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a construção deste trabalho, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre superfícies seletivas em frequência (FSS) utilizando elementos tridimensionais (3D), com foco na aplicação de técnicas de manufatura aditiva (impressão 3D). Inicialmente, é realizada uma caracterização dos materiais PLA tradicional e PLA de carbono quanto à permissividade elétrica e tangente de perda. A partir destes dados, duas FSS com substratos distintos (PLA tradicional e PLA carbono) são projetadas utilizando a geometria de dipolos cruzados e simuladas no software HFSS. Após a simulação, protótipos foram construídos e medidos utilizando um analisador de redes vetorial. Os resultados demonstram uma boa concordância entre os valores simulados e medidos. A FSS com substrato de PLA tradicional apresentou maior largura de banda quando comparada a FSS com PLA de carbono. A impressão 3D se mostrou uma técnica viável e eficiente para a fabricação de FSS, trazendo vantagens como custo reduzido, flexibilidade no design e possibilidade de fabricação de estruturas não planares.

Palavras-chave: FSS, impressão 3D, dipolo cruzado, PLA, caracterização eletromagnética.

ABSTRACT

This work presents a study on frequency selective surfaces (FSS) using three-dimensional (3D) elements, focusing on the application of additive manufacturing techniques (3D printing). Initially, the materials—standard PLA, carbon PLA, and conductive PLA—were characterized in terms of dielectric permittivity and loss tangent. Based on these parameters, two FSS structures with different substrates (standard PLA and carbon PLA) were designed using cross-dipole geometry and simulated with HFSS software. After simulation, prototypes were fabricated and measured using a vector network analyzer. The results show that the FSS with a standard PLA substrate presented a wider bandwidth, while the carbon PLA-based FSS showed better agreement between simulated and measured values. 3D printing proved to be a viable and efficient technique for FSS fabrication, offering advantages such as reduced cost, flexible design, and the ability to manufacture non-planar structures.

Keywords: FSS, 3D printing, cross-dipole, PLA, electromagnetic characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos tipo abertura e condutores	19
Figura 2 - N-Polos conectados pelo centro	19
Figura 3 - Grupo das Espiras	20
Figura 4 - Grupos dos sólidos	20
Figura 5 - Combinações	21
Figura 6 - Elementos Fractais	21
Figura 7 - Anteparo de forno de microondas	22
Figura 8 - Setup de caracterização elétrica dos filamentos	29
Figura 9 - Valores medidos da constante dielétrica em função da frequência.....	29
Figura 10 - Valores medidos da tangente de perda em função da frequência.....	30
Figura 11 - Dimensões da geometria: (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral.....	31
Figura 12 - Coeficiente de transmissão da FSS dipolo cruzado no substrato PLA tradicional em função da variação da espessura T.....	32
Figura 13 - Coeficiente de transmissão da FSS dipolo cruzado no substrato PLA carbono em função da variação da espessura T	33
Figura 14 - Foto dos protótipos construídos: (a) FSS com substrato de PLA tradicional e (b) FSS com substrato de PLA de carbono.....	34
Figura 15 - Setup de medições.....	35
Figura 16 - Comparação dos valores simulados e medidos da FSS sobre o substrato de PLA tradicional	35
Figura 17 - Comparação dos valores simulados e medidos da FSS sobre o substrato de PLA de carbono.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela com os resumos dos valores medidos dos filamentos	30
Tabela 2 - Valores das frequências de ressonância, larguras de banda e dos	33
Tabela 3 - Valores das frequências de ressonância, larguras de banda e dos	34
Tabela 4 - Valores medidos e simulados da frequência de ressonância, da largura de banda e do coeficiente de transmissão da FSS sobre o substrato de PLA tradicional	36
Tabela 5 - Valores medidos e simulados da frequência de ressonância, da largura de banda e do coeficiente de transmissão da FSS sobre o substrato de PLA de carbono	37

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

FSS – Superfície Seletiva em Frequência

IoT - Internet das coisas

5G - Quinta Geração Móvel

PLA – Políácido Lático

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

PETG – Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol

SLA – Estereolitografia

ADFSS - superfície seletiva de frequência totalmente dielétrica

FDM – Fused Deposition Modeling

FBW - Largura de banda fracionária

TPU - Poliuretano Termoplástico

RFID – Identificação por Rádio Frequência (Radio-Frequency Identification)

EMI – Interferência Eletromagnética (Electromagnetic Interference)

HFSS – High Frequency Structure Simulator

dB - Decibéis

GHz – Gigahertz

S21 – Parâmetro de Dispersão de Transmissão

PCB – Placa de Circuito Impresso (Printed Circuit Board)

RCS – Radar Cross Section (Seção Transversal de Radar)

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ_r - Constante dielétrica

μ_r - permeabilidade relativa complexa

$\text{tg}(\delta)$ - Tangente de perda

T - Espessura do elemento

H - Altura do substrato

W - Largura da geometria

L - Comprimento da geometria

f ou f_r - Frequência de ressonância

f_1 - Limite inferior da faixa de frequência (largura de banda)

f_2 - Limite superior da faixa de frequência (largura de banda)

BW - Largura de banda

S_{21} - Coeficiente de transmissão (em dB)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA	18
2.1. CLASSIFICAÇÃO DAS FFS.....	18
2.1.1. PREENCHIMENTO DA CÉLULA BÁSICA.....	18
2.1.2. GEOMETRIA DO ELEMENTO DA CÉLULA	19
2.1.3. FSS PASSIVAS E FSS RECONFIGURAVEIS.....	21
2.1.4. APLICAÇÕES DE FSS.....	21
3. MANUFATURA ADITIVA OU IMPRESSÃO 3D.....	23
3.1. TIPOS DE MATERIAIS	23
3.1.1. POLIÁCIDO LÁTICO – PLA.....	23
3.1.2. ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO – ABS	24
3.1.3. POLIETILENO TEREF TALATO DE ETILENO GLICOL – PETG.....	25
3.1.4. RESINAS.....	26
4. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE MATERIAIS	27
5. RESULTADOS	31
6. CONCLUSÕES	38
6.1. TRABALHOS FUTUROS	39
7. REFERÊNCIAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

O setor de telecomunicações vem experimentando um crescente avanço tecnológico tornando-se cada vez mais indispensável ao dia a dia da sociedade em geral. Dentro desse contexto, as comunicações móveis oferecem aos usuários a oportunidade de manterem um contato contínuo com outros, trazendo consigo facilidades e inovações nas formas de interações tanto pessoais quanto profissionais. Tecnologias como a IoT (Internet das Coisas), LoRa (*Long Range*), Wi-Fi 6, RFID (*Radio-Frequency Identification*) e sistemas de comunicação móvel de quinta geração (5G) são apenas alguns exemplos de aplicações que têm recebido uma atenção crescente por parte dos pesquisadores [1]. Tendo em vista que as tecnologias citadas anteriormente utilizam-se do mesmo meio de transmissão e podem compartilhar o mesmo ambiente é de suma importância limitar as interferências entre os diferentes sistemas, a fim proporcionar meios de transmissão com altas taxas de transmissão. Para satisfazer as demandas presentes e futuras nos serviços de telecomunicações, é essencial desenvolver dispositivos que possam fortalecer as tecnologias, minimizando as perturbações eletromagnéticas. Um dispositivo que tem recebido considerável atenção em pesquisas é a superfície seletiva de frequência (Frequency Selective Surface - FSS), devido às suas diversas aplicações na engenharia de telecomunicações tais como: radomes, satélites, sistemas de antenas refletoras, absorvedores entre outras [2]-[3]. Na literatura podemos encontrar várias pesquisas propondo FSS de diferentes, configurações, materiais e tipos de estruturas, como por exemplo, FSS em 2,5D [2], FSS em 3 dimensões (3D) [4] [5], FSS que têm seus elementos baseados em geometrias fractais [6], [7]; FSS dielétricas [8], entre outras. O estudo de FSS com elementos tridimensionais (3D) abre um novo horizonte para o design de dispositivos eletrônicos, oferecendo uma flexibilidade nos seus desenvolvimentos. Com o crescimento das redes de comunicação sem fio e as novas demandas dos sistemas de telecomunicações, as superfícies seletivas em frequência, FSS, vêm atraindo a atenção de vários grupos de pesquisa para diversas aplicações, tais como refletores, radomes, janelas eficientes, paredes eletromagneticamente inteligentes, entre outras [9].

A utilização da manufatura aditiva para o desenvolvimento de circuitos planares é uma das técnicas bastante estudada nesses últimos anos, pois permite uma flexibilidade no desenvolvimento de dispositivos não planos.

Em [10], foi apresentado o uso de técnicas de manufatura aditiva para a fabricação de superfícies seletivas de frequência, duas estruturas relativamente simples foram analisadas a cruz tripla e o espinho hexaédrico. A estrutura de cruz tripla foi fabricada usando um material a base de gesso. Já o espinho hexaédrico, foi fabricado usando filamento de ácido polilático (PLA). A metalização das estruturas foram realizadas manualmente. Os resultados simulados e medidos mostraram que a cruz tripla opera em cerca de 5,5 GHz mas oferece uma baixa estabilidade angular já a estrutura de espinho hexaédrico, opera em cerca de 2,5 GHz e oferece boa estabilidade angular planos xz e yz. Já em [11], foi analisada as propriedades dielétricas de vários polímeros impressos em 3D utilizando os métodos Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) e Aparelho de Estereolitografia (SLA) para avaliar seu potencial para aplicações no campo das telecomunicações. Foram utilizados dois métodos para a caracterização dos materiais, cavidade ressonante e guia de onda, O estudo mostrou que amostras feitas por FDM têm as menores perdas dielétricas e podem ser usadas para o design de antenas e radomes. Por fim as perdas de retorno de um filamento de ABS com carbono foi analisada na banda X (8 GHz – 12 GHz) e comparado com as perdas de retorno de uma carga comercial da HP. Os resultados demonstrando o potencial do filamento de ABS com carbono para aplicações em micro-ondas. A proposta de [12], é desenvolvimento de uma superfície seletiva de frequência totalmente dielétrica (ADFSS) utilizando algoritmos genéticos e transformadas rápidas de Fourier para gerar geometrias aleatórias. A FSS proposta mostrou uma largura de banda fracionária (FBW) de 54% na banda de rejeição e um campo de visão de 16°. Valores simulados e medidos apresentaram boa concordância. Superfícies seletivas de frequências foram desenvolvidas em [13] e otimizadas para aplicações na Banda X, em seguida foram fabricadas pelo processo impressão 3D, posteriormente medidas e comparadas com as simulações. Filamentos comerciais de impressão com partículas metálicas envolvidas, foram utilizados para o desenvolvimento das estruturas. Tais filamentos mostraram comportamentos de condutividade e até mesmo comportamento magnético. Resultados medidos e simulados apresentaram uma boa concordância. Em [14], é investigado a viabilidade do uso de composto de ácido polilático/grafite (G/PLA) para aplicações de absorção e blindagem. São apresentadas duas estruturas absorvedoras, uma piramidal truncado otimizada para a faixa de 2,6-4 GHz e uma superfície FSS otimizada para a faixa de 6-8,5 GHz. Caracterização do material foi realizada através do método guia de onda. Comparação de resultados simulados e medidos são apresentados e demonstram uma razoável concordância. Uma superfície seletiva de frequência de banda passante foi apresentada em [15], com elementos miniaturizados usando impressão

tridimensional (3D) e spray de metal condutor uniformemente depositado. O design proposto compreende padrões metálicos convolutos em ambos os lados de um substrato dielétrico (capacitores interdigitais na parte superior e linhas serpenteadas na parte inferior) em uma disposição ortogonal. A estrutura apresenta uma excelente estabilidade angular sob incidência oblíqua (até 75° de ângulo de incidência). Valores simulados e medidos do S_{11} e S_{21} apresentam razoável concordância incidência normal. Já em [16], foi realizado o estudo de um método de fabricação de uma superfície seletiva de frequência (FSS) utilizando um filamento de carbono condutivo através da tecnologia de impressão 3D. Caracterização do material, fabricação e medição são apresentados. Tal trabalho mostrou que ao alterar os parâmetros geométricos da camada impressa em 3D, é possível ajustar a frequência da banda de absorção da FSS. A análise de uma FSS dielétrica flexível fabricada aditivamente utilizando o poliuretano termoplástico (TPU) o qual possui uma constante dielétrica relativa (ϵ_r) de 3,5 foi apresentada em [17]. A estrutura atua como refletora na banda Ku e possui uma largura de banda de 700 MHz. Simulações demonstram uma boa estabilidade quando a estrutura é curvada. Uma boa concordância também é apresentada entre os valores simulados e medidos do coeficiente de transmissão. Em [18], é apresentada uma nova superfície seletiva de frequência (FSS) sintonizável mecanicamente impressa 3D em uma resina polimérica a qual possui uma constante dielétrica relativa (ϵ_r) de 3,8. Os resultados simulados mostraram que a estrutura possui tanto uma ampla faixa de sintonizável quanto uma boa estabilidade angular. Os resultados medidos mostram que o protótipo construído, possui uma faixa ajustável de 3,61 a 5,89 GHz. Em [19], é estudado a viabilidade de construir estruturas seletivas de frequência indutivas 3D de baixo custo na faixa de ondas milimétricas usando manufatura aditiva e duas diferentes técnicas de metalização. As estruturas desde trabalho foram fabricadas usando técnicas aditivas e, subsequentemente, metalizadas usando spray de níquel e galvanoplastia de cobre. Os resultados das medições e das simulações possuem uma razoável concordância. Também foi demonstrado que os protótipos apresentam menores perdas quando metalizados usando galvanoplastia de cobre devido à maior condutividade do cobre em comparação ao níquel. Desvantagem significativa na impressão SLA foram analisadas, como a deformação dos protótipos devido ao processo de cura, essa deformação alterou a resposta de frequência. Uma FSS reconfigurável impressa 3D em forma de grade dielétrica móvel é estudada em [20]. Foi utilizado o software *Ansys HFSS EM* para simulação. Uma boa concordância entre os valores simulados e medido são mostrados.

Este trabalho tem como objetivo a caracterização teórica e prática do processo de desenvolvimento de superfícies seletivas de frequência 3D utilizando como técnica de fabricação a manufatura aditiva.

Especificamente, no desenvolvimento das FSS, são utilizados filamentos 3D tradicional, com carbono e condutivo. Uma rigorosa caracterização quanto à constante dielétrica e à tangente de perda dos filamentos 3D tradicional e com carbono foi realizada em laboratório. A técnica empregada na caracterização dos filamentos foi o método da sonda coaxial. Após a caracterização dos filamentos, protótipos foram desenvolvidos e analisados utilizando o *software* comercial *Ansys HFSS*. Por fim, os protótipos analisados foram fabricados e medidos, utilizando o analisador de rede vetorial *Agilent E5071C* da *Agilent Technologies*.

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, descritos sumariamente a seguir.

O capítulo 2 apresenta a estrutura e as principais características das superfícies seletivas de frequência, os tipos de elementos e as técnicas de medição empregadas e algumas das suas mais variadas aplicações. No capítulo 3 descreve o que é a manufatura aditiva e os principais materiais para impressões 3D. No capítulo 4 é descrito as técnicas de caracterização eletromagnética de materiais. É mostrado também os resultados das caracterizações feitas dos materiais utilizados neste trabalho. No capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações e das comparações dos valores simulados e medidos. Por último, o capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho, identificando suas principais contribuições e sugestões para a continuidade do trabalho.

2. SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA

As superfícies seletivas em frequência consistem normalmente por arranjos periódicos bidimensionais, gravados na superfície de um substrato dielétrico com espessura h e constante dielétrica ϵ_r . Elas demonstram um comportamento análogo ao de filtros eletromagnéticos, sendo projetadas com o propósito de controlar a reflexão ou transmissão de ondas eletromagnéticas em várias faixas de frequência [21]-[22]. As FSS têm muitas aplicações e têm contribuído significativamente para melhorar o desempenho dos circuitos de comunicações [23].

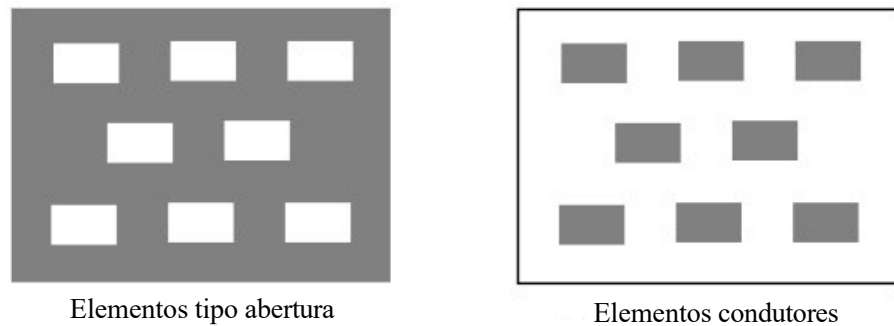
2.1. CLASSIFICAÇÃO DAS FFS

As FSS podem ser classificadas de diferentes formas. A seguir são apresentadas algumas dessas classificações.

2.1.1. PREENCHIMENTO DA CÉLULA BÁSICA

FSS do tipo abertura trabalha como um filtro passa-faixa, onde, na medida em que os elementos vão entrando em ressonância, a estrutura vai se tornando transparente para a onda incidente. Dessa forma, até que na frequência de ressonância da estrutura, ocorre a transmissão total da onda. Já a FSS do tipo Patch funciona como um filtro rejeita-faixa, pois os elementos vão entrando em ressonância irradiando a potência incidente na direção de reflexão até que na frequência de ressonância da estrutura, ela se comporta como um condutor perfeito refletindo totalmente a onda incidente [23].

Figura 1 - Elementos tipo abertura e condutores



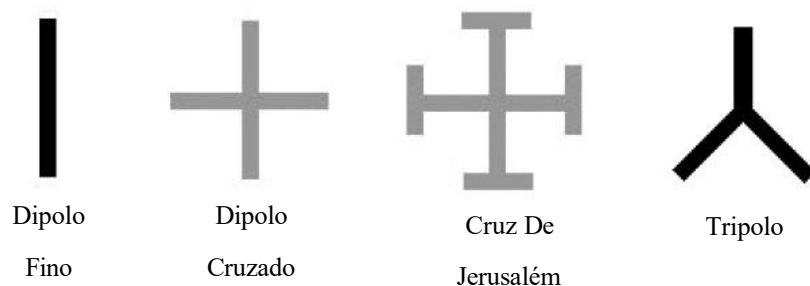
Fonte: [23]

2.1.2. GEOMETRIA DO ELEMENTO DA CÉLULA

A geometria do elemento ressonante (patch) em uma FSS exerce influência direta na distribuição de corrente induzida sobre sua superfície. Essa distribuição de corrente, por sua vez, determina o padrão de distribuição do campo eletromagnético na superfície da FSS, impactando suas características de filtragem. Adicionalmente, as FSS podem ser categorizadas em cinco grupos principais com base na geometria de seus elementos constituintes, conforme detalhado a seguir [1], [23]:

O Grupo I: formado pelos elementos do tipo N-polos conectados pelo centro. Na Figura 2 abaixo é mostrado como são especificados esses N-polos.

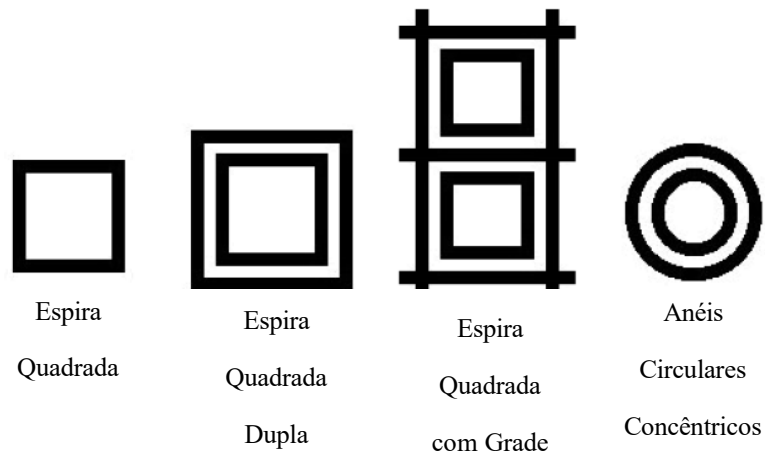
Figura 2 - N-Polos conectados pelo centro



Fonte: [23]

Grupo II: elementos do tipo *loop*, como espiras. Os tipos mais comuns usados em projetos são as espiras quadradas, quadradas duplas, quadradas com grades e anéis circulares concêntricos. A figura 3 ilustra como são esses elementos.

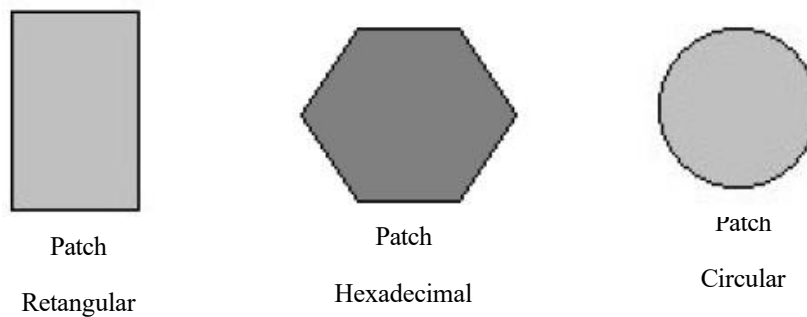
Figura 3 - Grupo das Espiras



Fonte: Fonte: [23]

Grupo III: reúne os elementos de interior sólido. Com os elementos do tipo sólido é comum terem os de patches retangulares, hexagonais e circulares como é demonstrado na figura 4.

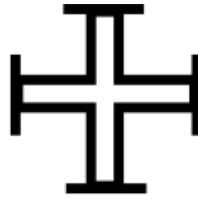
Figura 4 - Grupos dos sólidos



Fonte: Fonte: [23]

Grupo IV: reúne os elementos composto a partir das combinações de dois ou três elementos pertencentes aos outros grupos anteriores, figura 5.

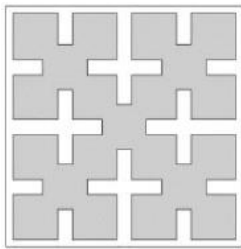
Figura 5 - Combinações



Fonte: Fonte: [23]

Grupo V: formado por elementos fractais, conforme mostrado na figura 6.

Figura 6 - Elementos Fractais



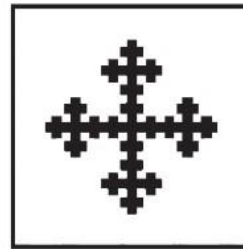
Fractal Koch

Fonte: [24]



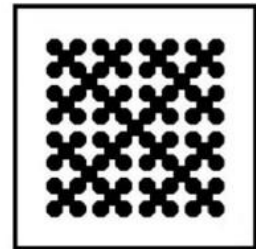
Fractal 4 bandas

Fonte: [25]



Fractal Vicsek

Fonte: [26]



Fractal Sierpinksi

Fonte: [27]

2.1.3. FSS PASSIVAS E FSS RECONFIGURAVEIS

Uma FSS passiva é aquela em que os elementos são projetados em uma camada dielétrica para transmitir ou rejeitar uma frequência específica. A vantagem desse tipo de FSS é que ela é fácil de fabricar, mas a desvantagem é que não pode ser reconfigurada. Por outro lado, uma FSS reconfigurável inclui alguns dispositivos eletrônicos ativos, como díodos. A adição desses elementos ativos permite um controle mais prolongado do comportamento da estrutura, além de tornar a FSS menor e habilitada para receber a configuração desejada. No entanto, a desvantagem é que a fabricação dessas estruturas é mais complexa [4].

2.1.4. APLICAÇÕES DE FSS

Atualmente, é notório o alto crescimento no uso de FSS para diversas aplicações nas mais variadas engenharias para variados tipos de produtos e serviços. Dentre essas aplicações, destacam-se sistemas de antenas, foguetes, mísseis, radomes, sub-refletores, matriz de lentes refletoras, *tags* de RFID, aumento de RCS (*Radar Cross Section*), planejamento de trajetória, proteção contra EMI (*Eletromagnetic Interference*), estruturas *bandgap* fotônicas, acoplamento de guia de onda ou cavidade controlada, dentre outras [5] – [6].

A aplicação mais conhecida das FSS talvez seja o anteparo da porta do forno de micro-ondas. Este anteparo funciona como um filtro passa-faixa que deixa passar a faixa de frequência da luz visível e rejeita a faixa de micro-ondas. A figura 7 abaixo ilustra o fato mencionado.

Figura 7 - Anteparo de forno de micro-ondas



Fonte: [28]

3. MANUFATURA ADITIVA OU IMPRESSÃO 3D

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, é um método de fabricação que difere significativamente dos processos tradicionais de fabricação, como moldagem ou usinagem. Ela envolve a criação direta de objetos físicos a partir de modelos de design assistido por computador (CAD), utilizando um processo de construção em camadas. A manufatura aditiva revoluciona a forma como os objetos são produzidos, permitindo maior flexibilidade de design, economia de materiais e a criação de produtos com complexidades geométricas inéditas. Isso a torna uma tecnologia que pode ser usada em uma ampla variedade de aplicações, como por exemplo: em setores como moda, arquitetura, alimentos e até mesmo na construção de casas e até na fabricação de componentes aeroespaciais e médicos. A rápida evolução do cenário tecnológico em torno da digitalização, conectividade e automação, está impulsionando uma revolução no uso da impressão 3D. Tecnologia esta que faz parte das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, que engloba também, robôs autônomos, simulação digital, integração entre sistemas, *IoT*, *big data* e *analytics*, computação na nuvem, segurança cibernética e realidade aumentada [29]. A ampla adoção de impressoras 3D tem o potencial de revolucionar significativamente a pesquisa no campo das telecomunicações, uma variedade de estruturas 3D pode ser fabricada de maneira fácil, rápida, com baixo custo e abrir novas possibilidades para uma variedade de novas aplicações em engenharia de micro-ondas e RF.

3.1. TIPOS DE MATERIAIS

Para manufatura ou impressão com elementos em 3D é mais comum o uso dos materiais mencionados citados abaixo.

3.1.1. POLIÁCIDO LÁTICO – PLA

O filamento PLA para impressora 3D é, junto com o ABS, um material bastante usado nessa tecnologia. Dentre suas principais vantagens podemos destacar a facilidade do seu manuseio, impressão, uma vez que não é necessário ter alto conhecimento no manejo desse material conforme discutido em [30]. Além disso, seu custo-benefício e alta disponibilidade

para aplicações com elementos 3D, seu uso vem se intensificando de forma exponencial entre os iniciantes em projetos principalmente de FSSs. A composição material do PLA consiste em um poliéster alifático, termoplástico, semicristalino ou amorfo, bi compatível e biodegradável, sintetizado a partir do ácido láctico obtido de fontes renováveis [31]. O PLA é um termoplástico biodegradável, não tóxico e considerado uma opção mais ecológica em relação à maioria dos filamentos utilizados em impressoras 3D. De acordo com [32], “este filamento de impressão 3D é mais amigo do ambiente em comparação com outros materiais plásticos”.

Ao ser aquecido para extrusão, libera um leve aroma adocicado. Ele se decompõe em ácido láctico, substância segura para o organismo humano — o que permite seu uso na medicina, especialmente em suturas e implantes cirúrgicos.

Por sua facilidade de uso, o PLA é ideal para iniciantes na impressão 3D. Além disso, é empregado na fabricação de louças descartáveis, embalagens de alimentos e produtos de higiene, apresentando menor tendência à deformação se comparado ao ABS.

No entanto, por ser quebradiço, não é recomendado para peças que exigem alta resistência mecânica ou que serão expostas a temperaturas superiores a 60 °C [33]. Neste trabalho é usado o PLA de carbono pois se tem alta rusticidade, PLA tradicional e o PLA condutivo a qual substituir placas de circuito impresso em aplicações de micro-ondas.

3.1.2. ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO – ABS

Com características bem semelhantes ao PLA, a Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) possui alta rusticidade, custo-benefício, leveza, flexibilidade e moldagem. Além disso, seu comportamento em altas temperaturas também é bastante positivo uma vez que a sua resistência é eficaz, ideal para variados tipos de projetos usando impressora 3D. Um ótimo isolante elétrico, ótima durabilidade etc. Com isso, devido a essas propriedades e características, seu uso na construção de estruturas vem se intensificando bastante e, assim, consequentemente aumentando a demanda da procura desse material [34].

O material ABS apresenta vantagens significativas em comparação ao PLA, especialmente no que diz respeito às suas propriedades mecânicas. Trata-se de um polímero resistente, durável e relativamente leve. Dentre seus principais atributos, destaca-se a capacidade de suportar temperaturas mais elevadas, além de possuir certa flexibilidade. Um de

seus maiores atrativos, no contexto da impressão 3D, é o fato de ser o termoplástico com menor custo disponível no mercado de filamentos.

Apesar dessas qualidades, o ABS possui algumas limitações. Durante o processo de impressão, é comum a liberação de vapores considerados tóxicos, o que exige que a impressão seja realizada em ambientes bem ventilados. Por ser um derivado do petróleo, o ABS não é biodegradável, diferentemente do PLA. Além disso, demanda temperaturas mais altas para fusão e apresenta tendência à deformação tanto durante quanto após a impressão. Por esse motivo, recomenda-se o uso de mesa aquecida e impressoras com compartimento fechado para melhor controle térmico [33].

3.1.3. POLIETILENO TEREF TALATO DE ETILENO GLICOL – PETG

Diferentemente dos outros dois materiais citados, o PETG ou PET-G possui características superiores aos anteriores quando se trata de desenvolver projetos usando impressora 3D. Dentre suas principais diferenças é possível destacar sua alta resistência a altas temperaturas, a não propagação de chamas, é mais fácil de imprimir do que o ABS, pois o PETG precisa de uma mesa de impressão com temperatura mais baixa do que o ABS, pode ser soldado por rádio frequência e proporciona adesão entre camadas superiores ao PLA e ABS, com pouca deformação durante as impressões [35]. O Polietileno Tereftalato é um poliéster, transparente, brilhante, leve com boa performance de design e facilidade de moldagem, que proporciona alta resistência mecânica (impactos) e química além de ter barreiras para gases e odores [36]. O politereftalato de etileno (PET) em sua forma não modificada apresenta limitações de processamento que o tornam pouco comum no contexto da manufatura aditiva. Por outro lado, o PETG — uma variação do PET com adição de glicol — apresenta características físico-químicas aprimoradas que o tornam especialmente adequado para aplicações em impressão 3D. O PETG combina resistência mecânica superior e flexibilidade, superando o PLA nesses aspectos, enquanto oferece maior facilidade de extrusão e menor propensão a deformações térmicas do que o ABS, sendo considerado por profissionais e entusiastas como um polímero de desempenho intermediário ideal para peças funcionais e componentes submetidos a esforços moderados [33].

Estes materiais são recicláveis e não emitem fumos tóxicos nem odores perceptíveis durante o processo de extrusão. O intervalo de temperatura ideal para impressão situa-se entre

220 °C e 250 °C, sendo imprescindível a utilização de mesa aquecida para garantir adequada adesão da primeira camada e minimizar riscos de warping.

Portanto, futuramente o PETG será o substituto do PLA e ABS por conta dessa ampla variedade de vantagens.

3.1.4. RESINAS

Os avanços na impressão 3D continuam mudando a maneira como indústrias, empresas e profissionais abordam o processo de prototipação e produção. Com isso, diferentes métodos de impressão 3D são cada vez mais populares. Um desses métodos é a impressão 3D em resina. Essa técnica é famosa por sua capacidade de produzir protótipos e peças de alta precisão, com maior nível de detalhes e acabamento superficial suave [37].

As impressoras 3D mais comuns usam o tipo de impressão FDM (fused deposition modeling) que usa o princípio da modelagem para criar os objetos, ou seja, o plástico é derretido em camadas até que o objeto escolhido começa a ganhar forma. No caso deste trabalho, os objetos criados foram os dipolos cruzados e as placas de circuito impresso. No entanto, quando se trata da resina como material, usa-se impressoras 3D do tipo SLA (stereolithography). Essa tecnologia usa a luz ultravioleta para transformar a resina em algo sólido. A estereolitografia foi o primeiro processo de prototipagem disponível comercialmente, sendo apresentado ao mercado em 1988 na feira US Autofact, pela empresa 3D Systems Inc. dos Estados Unidos. Esse processo utiliza uma resina fotocurável, sendo a cura obtida pela aplicação de um laser com comprimento de onda específico, geralmente UV (ultravioleta) e pode ser realizado através de técnicas como projeção de luz digital (DLP - Digital Light Processing) e a laser. A principal diferença entre as duas é que, enquanto o laser escaneia a superfície da camada que está sendo criada solidificando a resina ponto a ponto, o projetor ilumina a camada inteira realizando a cura de uma só vez [38]. Por ser uma tecnologia com o custo não tão acessível, as impressoras do tipo FDM continuam no topo das mais usadas na fabricação de objetos em 3D para a maioria dos projetos.

4. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE MATERIAIS

Diversos setores industriais necessitam de um conhecimento mais aprofundado dos materiais que empregam, com o objetivo de reduzir os ciclos de projeto, aprimorar o monitoramento de processos e garantir a qualidade. Nesse contexto, a medição das propriedades dielétricas dos materiais tornou-se cada vez mais relevante, pois fornece dados essenciais sobre suas características elétricas e magnéticas. Tais informações são utilizadas em diferentes áreas de pesquisa, incluindo ciência dos materiais, design de circuitos de micro-ondas, desenvolvimento de absorvedores, estudos biológicos e aplicações na indústria alimentícia, entre outras.

A análise das propriedades dielétricas envolve a medição da permissividade relativa complexa (ϵ_r) e da permeabilidade relativa complexa (μ_r) dos materiais. A permissividade dielétrica complexa apresenta uma parte real e uma parte imaginária. A parte real, conhecida como constante dielétrica, indica a quantidade de energia armazenada no material devido a um campo elétrico externo. Já a parte imaginária, denominada fator de perda, representa a energia dissipada pelo material sob a influência desse campo elétrico; em materiais sem perdas, essa parte imaginária é nula. A tangente de perda (**$\tan\delta$**) expressa a relação entre a parte imaginária e a parte real da permissividade complexa [39].

Da mesma forma, a permeabilidade complexa é composta por uma parte real, que indica a energia armazenada pelo material sob um campo magnético externo, e uma parte imaginária, que representa a energia dissipada devido ao campo magnético. A medição da permeabilidade complexa aplica-se apenas a materiais magnéticos, sendo que a maioria dos materiais não é magnética, o que faz com que sua permeabilidade seja muito próxima à do espaço livre.

Medições precisas dessas propriedades fornecem informações valiosas para que cientistas e engenheiros integrem adequadamente os materiais em projetos mais eficazes ou monitorem processos de fabricação, o que aprimora o controle de qualidade. Diversos instrumentos, acessórios e softwares estão disponíveis no mercado para medir as propriedades elétricas e magnéticas dos materiais, incluindo analisadores de rede, medidores de LCR e analisadores de impedância, que variam conforme o tipo de amostra e a faixa de frequência desejada.

Para selecionar um método adequado de caracterização de materiais, devem-se considerar:

- A faixa de frequência em que o material será aplicado;

- As propriedades físicas específicas do material em análise;
- A forma e natureza das amostras disponíveis, como placas ou filmes finos, líquidos ou sólidos, elastômeros ou materiais granulares.

Atualmente, diversos métodos estão disponíveis para medir as propriedades elétricas e magnéticas dos materiais, cada um adequado a faixas de frequência e tipos específicos de materiais. Os principais métodos para caracterização eletromagnética de materiais dielétricos incluem:

- Sonda coaxial (Coaxial probe);
- Linha de transmissão (Transmission line);
- Espaço livre (Free space);
- Cavidade ressonante (Resonant cavity);
- Placas paralelas (Parallel plate);
- Medição por indutância (Inductance measurement).

Cada método requer que a amostra do dielétrico seja preparada conforme as especificações dos equipamentos a serem utilizados para a caracterização [40].

Neste trabalho, a técnica escolhida para caracterização dos materiais foi o método da sonda coaxial, no qual a permissividade dielétrica é calculada a partir do parâmetro S_{11} . Esse método é mais adequado para amostras líquidas e semissólidas; contudo, amostras sólidas também podem ser caracterizadas, desde que possuam uma superfície plana, evitando, assim, a formação de espaços de ar entre a amostra e a sonda. Para essa etapa de caracterização, utilizou-se um analisador de rede vetorial *Agilent E5071C*, combinado com o kit de caracterização elétrica 85070E. A figura 8 apresenta o setup de medição.

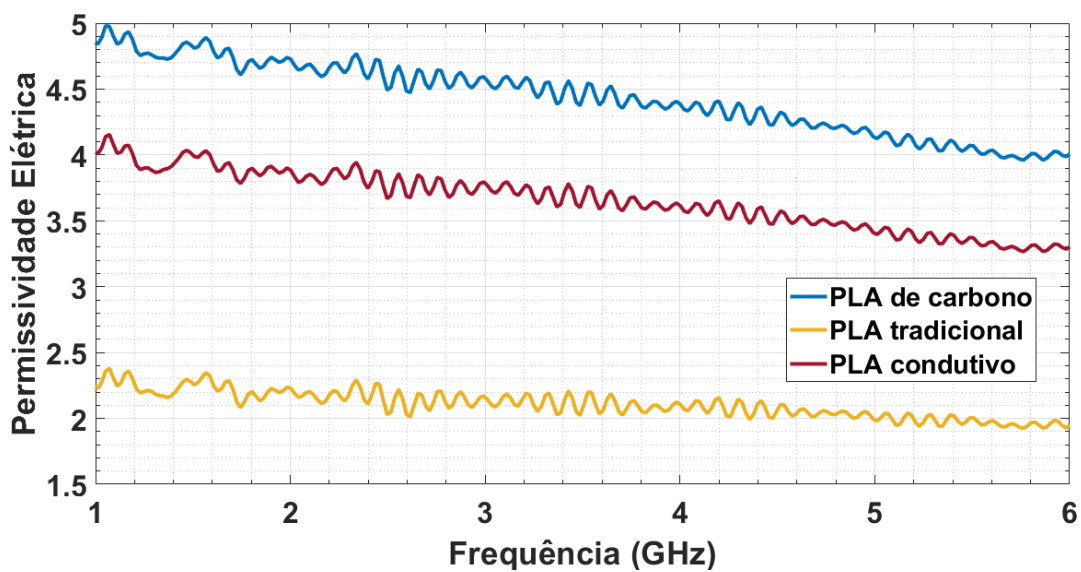
Figura 8 - Setup de caracterização elétrica dos filamentos



Fonte: Autor.

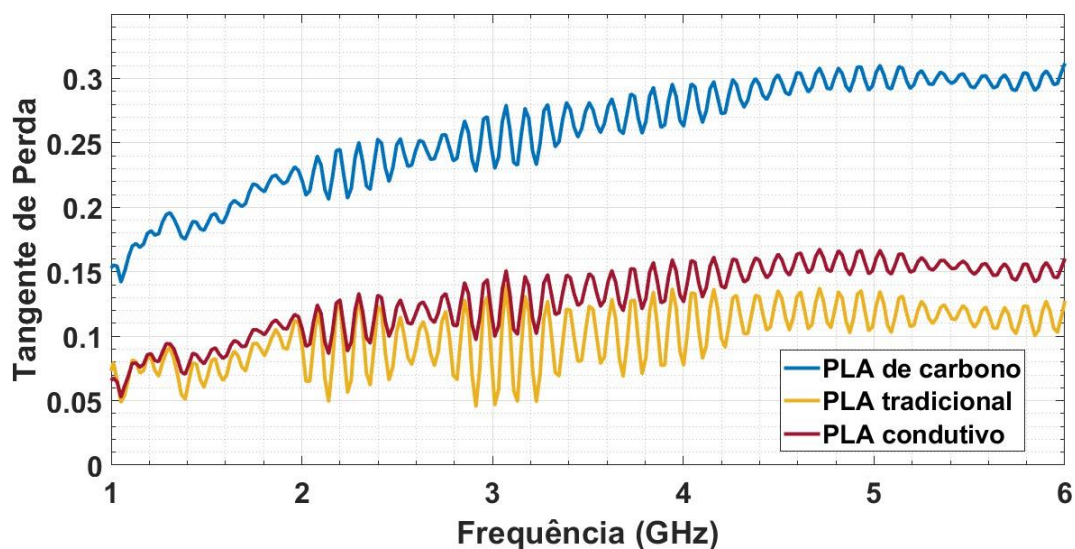
Antes da realização das medições das propriedades dos filamentos 3D, uma calibração é realizada e em seguida uma medição de algum material conhecido é feita para validar o processo de calibração. As Figuras 9 e 10 mostram os valores medidos para a permissividade elétrica e tangente de perda respectivamente.

Figura 9 - Valores medidos da constante dielétrica em função da frequência



Fonte: Autor.

Figura 10 - Valores medidos da tangente de perda em função da frequência



Fonte: Autor.

A Tabela 1 mostra de forma resumida a permissividade elétrica e a tangente de perda dos filamentos 3D caracterizados para a frequência de 3,5 GHz.

Tabela 1 - Tabela com os resumos dos valores medidos dos filamentos

Filamento 3D	ϵ_r	$tg(\delta)$
PLA tradicional	2,05	0,083
PLA de carbono	4,57	0,149
PLA condutivo	3,76	0,09

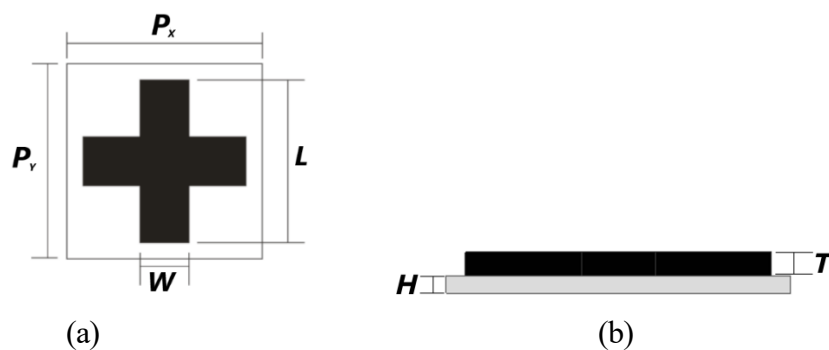
5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos neste trabalho. Foram realizadas inúmeras simulações referentes às estruturas propostas utilizando o *software* comercial *Ansys HFSS*. Com o intuito de validar os resultados obtidos, foram construídos e medidos protótipos das estruturas simuladas.

Os filamentos 3D utilizados para a análise e desenvolvimento das FSSs foram: PLA, PLA Carbono e o PLA condutivo. Os filamentos PLA e o PLA carbono foram utilizados para construir as placas que foram aplicados como substrato e o PLA condutivo para construir os elementos das FSSs. De acordo com a caracterização dos filamentos mostrada no Capítulo 4, os filamentos utilizados como substrato possuem os seguintes parâmetros: o PLA possui espessura $H = 2$ mm, constante dielétrica $\epsilon_r = 2,05$ e tangente de perda $\tan\delta = 0,083$ e o PLA Carbono possui espessura $H = 2$ mm, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,57$ e tangente de perda $\tan\delta = 0,149$.

Para este trabalho, foram analisadas duas estruturas com substratos diferentes e com geometrias idênticas na forma de dipolo cruzado com largura $W = 8,6$ mm e comprimento $L = 35,5$ mm e espessura do elemento T em mm a qual foi estudada sua variação. A matriz é composta por células com periodicidade $P_x = P_y = 40$ mm, ao longo dos eixos x e y , respectivamente. Todas as dimensões das estruturas citadas podem ser observadas na Figura 11.

Figura 11 - Dimensões da geometria: (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral

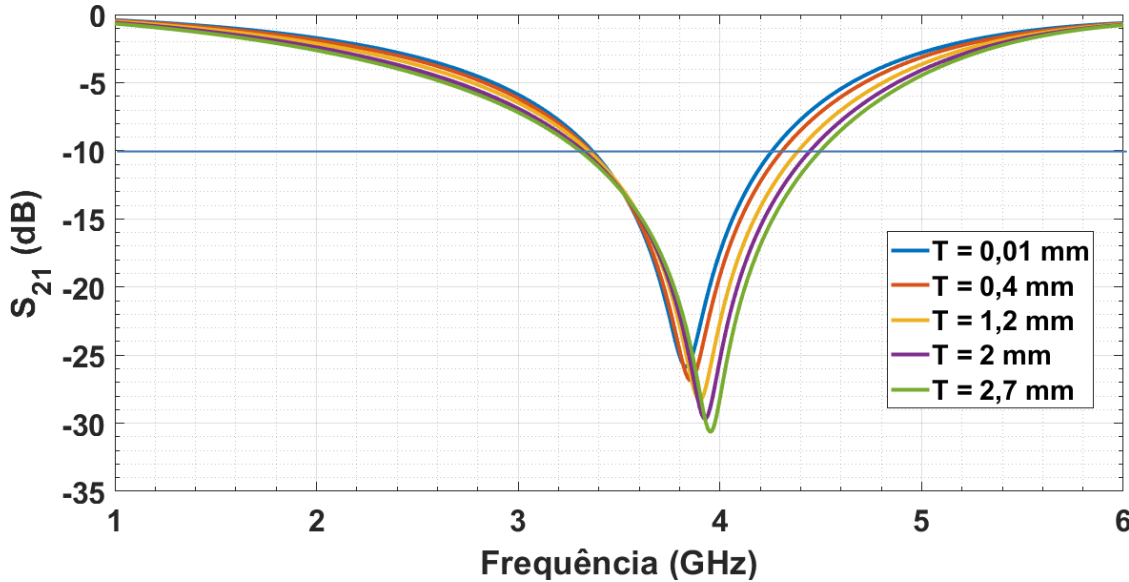


Fonte: Autor.

Inicialmente uma análise paramétrica foi realizada para verificar o comportamento do coeficiente de transmissão em função da frequência das FSS propostas com relação à variação da espessura do elemento dipolo cruzado (T).

A Figura 12 mostra o comportamento da FSS desenvolvida sobre o substrato de PLA tradicional da frequência e da variação da espessura dos elementos dipolo cruzado.

Figura 12 - Coeficiente de transmissão da FSS dipolo cruzado no substrato PLA tradicional em função da variação da espessura T



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 12, para a FSS analisada sobre o substrato de PLA com elementos de dipolo cruzado, resultados em banda larga foram obtidos, considerando como referência o coeficiente de transmissão -10 dB . Além disso, quando a espessura do elemento de dipolo cruzado da FSS é aumentada, observamos um aumento da frequência de ressonância, ou seja, um deslocamento da esquerda para direita da frequência de ressonância, é possível observar também na Figura 12, um aumento na largura de banda e no coeficiente de transmissão quando aumentamos a espessura do elemento da FSS.

Os valores da frequência de ressonância, largura de banda e coeficiente de transmissão para cinco valores diferentes de espessura T , podem ser vistos na Tabela 2 para a FSS desenvolvida sobre o substrato de PLA com altura H igual a 2 mm.

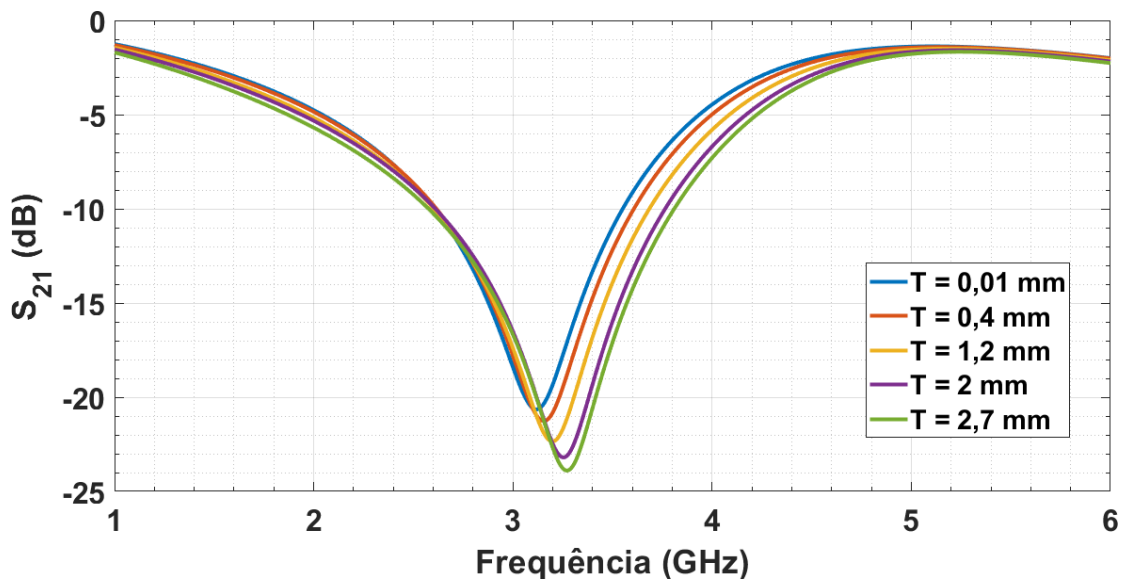
Tabela 2 - Valores das frequências de ressonância, larguras de banda e dos coeficientes de transmissão para a FSS com substrato de PLA em função da variação da espessura T

T (mm)	f_r (GHz)	f_1 (GHz)	f_2 (GHz)	BW (GHz)	S_{21} (dB)
0,01	3,83	3,37	4,25	0,89	-25,85
0,4	3,86	3,36	4,31	0,95	-26,84
1,2	3,9	3,35	4,39	1,04	-28,34
2	3,93	3,32	4,44	1,12	-29,67
2,7	3,95	3,31	4,50	1,19	-30,64

Levando em consideração a espessura mais fina do elemento de 0,01 mm e a espessura mais grossa de 2,7 mm, os números dos resultados simulados apresentados na Tabela 2 demonstram um aumento de 33,7% na largura de banda e uma melhora no coeficiente de transmissão de 18,5%. A variação na frequência de ressonância foi de apenas 3,1%.

Os resultados obtidos para a comportamento da FSS com substrato de PLA carbono em função da variação da espessura dos elementos dipolo cruzado, podem ser observados na Figura 13. Resultados em banda larga foram obtidos, considerando como referência o coeficiente de transmissão -10 dB.

Figura 13 - Coeficiente de transmissão da FSS dipolo cruzado no substrato PLA carbono em função da variação da espessura T



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 13, para a FSS analisada sobre o substrato de PLA Carbono com elementos de dipolo cruzado, quando a espessura do elemento é aumentada, observamos um aumento da frequência de ressonância, ou seja, um deslocamento da esquerda para direita

da frequência de ressonância, mesmo comportamento da FSS com substrato de PLA tradicional analisado anteriormente. Também é possível observar, um aumento na largura de banda e uma melhora no coeficiente de transmissão quando aumentamos a espessura do elemento da FSS.

Os valores da frequência de ressonância, largura de banda e coeficiente de transmissão para cinco valores diferentes de espessura T , podem ser vistos na Tabela 3 para a FSS desenvolvida sobre o substrato de PLA com altura H igual a 2 mm.

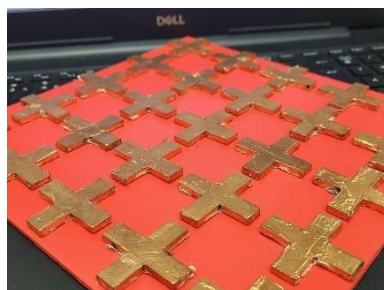
Tabela 3 - Valores das frequências de ressonância, larguras de banda e dos coeficientes de transmissão para a FSS com substrato de PLA Carbono em função da variação da espessura T

T (mm)	f_r (GHz)	f_1 (GHz)	f_2 (GHz)	BW (GHz)	S_{21} (dB)
0,01	3,12	2,61	3,55	0,94	-20,65
0,4	3,16	2,62	3,61	0,99	-21,26
1,2	3,2	2,60	3,68	1,08	-22,35
2	3,26	2,61	3,76	1,15	-23,18
2,7	3,27	2,58	3,81	1,23	-23,90

Da mesma forma que na estrutura anterior, levando em consideração a espessura mais fina do elemento de 0,01 mm e a espessura mais grossa de 2,7 mm, os números dos resultados simulados apresentados na Tabela 3 demonstram um aumento de 30,8% na largura de banda, ou seja, um aumento de quase 300 MHz e uma melhora no coeficiente de transmissão de 15,7%. A variação na frequência de ressonância foi de apenas 4,8%.

A fim de validar os resultados das duas estruturas simuladas, um protótipo de cada estrutura foi construído e medido. As medições foram realizadas utilizando um analisador de rede vetorial *Agilent E5071C*. Os protótipos construídos podem ser vistos na Figura 14.

Figura 14 - Foto dos protótipos construídos: (a) FSS com substrato de PLA tradicional e (b) FSS com substrato de PLA de carbono



(a)

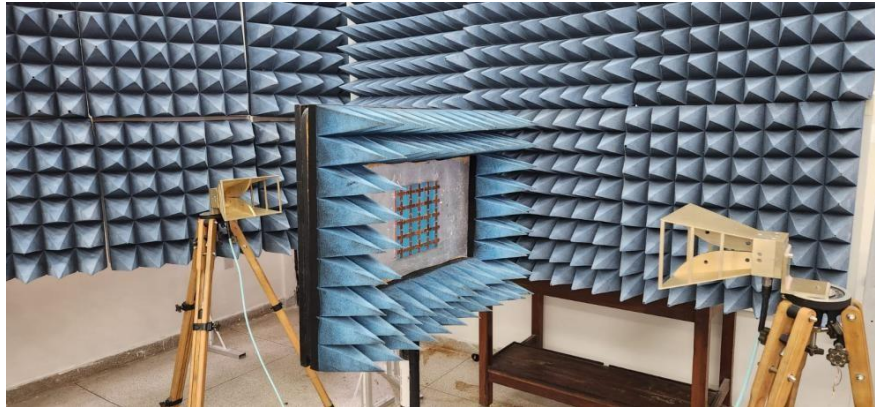


(b)

Fonte: Autor.

Diversos *setups* podem ser utilizados para medição das propriedades de transmissão e reflexão de uma superfície seletiva de frequência [23]. Na Figura 15 podemos observar o setup utilizado na medição dos protótipos deste trabalho. A medição é realizada utilizando um analisador de redes, duas antenas de ganho padrão (antena transmissora e receptora) e um suporte para fixação da FSS.

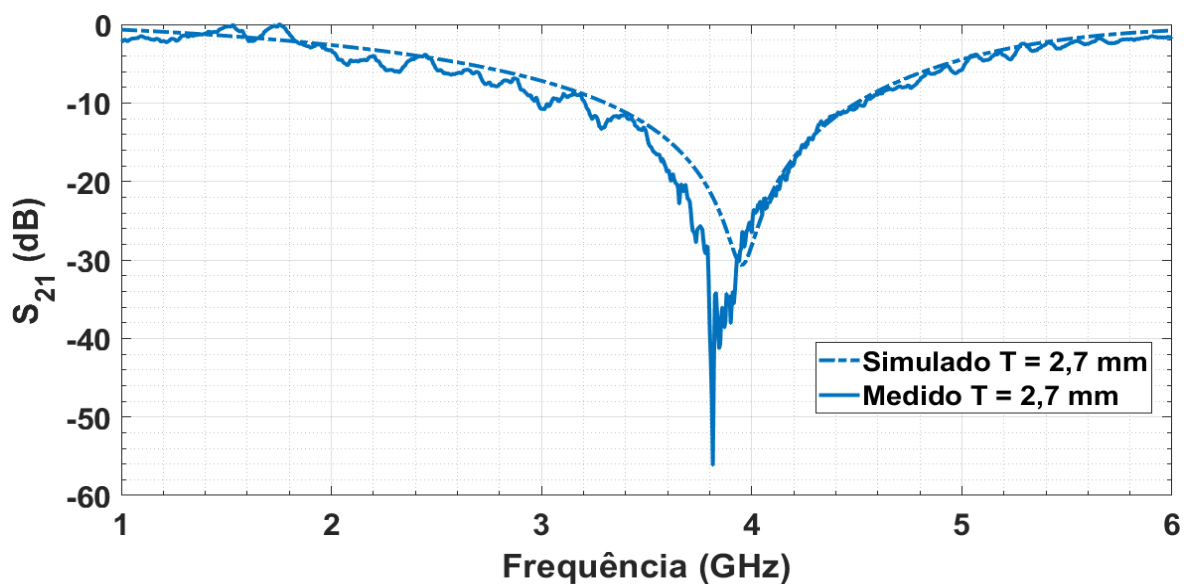
Figura 15 - Setup de medições



Fonte: Autor.

A Figura 16 mostra a comparação do comportamento do coeficiente de transmissão em função da frequência para a FSS com elementos de dipolo cruzado sobre o substrato de PLA tradicional.

Figura 16 - Comparação dos valores simulados e medidos da FSS sobre o substrato de PLA tradicional



Fonte: Autor.

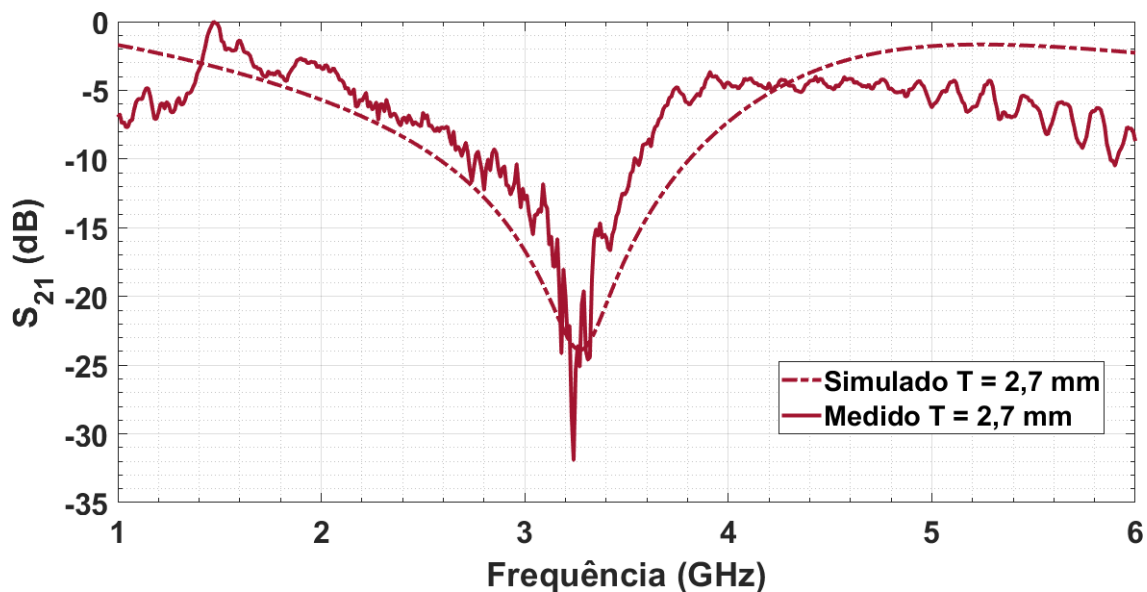
Para fins de comparação, os resultados simulados obtidos utilizando o *Ansys HFSS* e medido são apresentados na Tabela 4. Uma boa concordância é observada para os parâmetros da FSS. O valor medido apresentou uma largura de banda aproximadamente de 11,7% (considerando-se um nível de referência -10 dB) maior que o valor simulado e um coeficiente de reflexão de -56,12 dB. Um pequeno deslocamento na frequência de ressonância do valor medido quando comparado com o valor simulado foi observado, aproximadamente 3,6%.

Tabela 4 - Valores medidos e simulados da frequência de ressonância, da largura de banda e do coeficiente de transmissão da FSS sobre o substrato de PLA tradicional

	f_r (GHz)	f_1 (GHz)	f_2 (GHz)	BW (GHz)	S_{21} (dB)
Simulado	3,95	3,31	4,50	1,19	-30,64
Medido	3,81	3,21	4,54	1,33	-56,12

A Figura 17 mostra a comparação do comportamento do coeficiente de transmissão em função da frequência para a FSS com elementos de dipolo cruzado sobre o substrato de PLA de carbono.

Figura 17 - Comparação dos valores simulados e medidos da FSS sobre o substrato de PLA de carbono



Fonte: Autor.

A Tabela 5 apresenta a comparação dos valores simulados e medidos para fins de comparação. Uma boa concordância pode ser observada para os parâmetros da FSS. A frequência de ressonância do valor medido apresentou um pequeno deslocamento de

aproximadamente 0,9%. Já a largura de banda apresentou uma redução de 240 MHz (considerando-se um nível de referência -10 dB). O coeficiente de reflexão foi de -31,91 dB.

Tabela 5 - Valores medidos e simulados da frequência de ressonância, da largura de banda e do coeficiente de transmissão da FSS sobre o substrato de PLA de carbono

	f_r (GHz)	f_1 (GHz)	f_2 (GHz)	BW (GHz)	S_{21} (dB)
Simulado	3,27	2,58	3,81	1,23	-23,90
Medido	3,24	2,58	3,57	0,99	-31,91

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os resultados da análise e caracterização de duas superfícies seletivas em frequência 3D, baseada na geometria dipolo cruzado. Os substratos utilizados nas FSS foram impressos com filamentos 3D, PLA tradicional e o PLA de Carbono. Já os elementos das FSS foram impressos com o PLA condutivo. Foi realizado um estudo criterioso das principais propriedades físicas de cada filamento 3D utilizado como substrato, com medição da permissividade elétrica e da tangente de perdas.

Após a caracterização do material, foi realizada uma análise paramétrica para verificar o comportamento das características das FSS. A análise das FSS 3D, realizadas com software comercial *Ansys HFSS* permitiu a determinação das suas principais características, como frequência de ressonância, largura de banda e coeficiente de transmissão. Após as simulações, os melhores resultados de cada FSS foram escolhidos para a construção dos protótipos. Dois protótipos diferentes foram construídos e medidos.

Nas primeiras medições realizadas foi observado que os elementos de dipolo cruzados foram construídos com o filamento 3D condutivo não apresentava as características necessárias para uma FSS, por isso, teve a necessidade de envolver os elementos com uma fita metalizada de cobre. Após o revestimento dos elementos da FSS, novas medições foram feitas e uma boa concordância entre os valores simulados e medidos foi observada. O protótipo da FSS de PLA tradicional foi a que apresentou uma maior largura de banda, cerca de 1,33 GHz. Já o protótipo da FSS de carbono foi a que apresentou um menor erro, aproximadamente 0,9% com relação a frequência de ressonância.

Algumas aplicações para a estrutura apresentada também podem ser consideradas. Dentre essas aplicações é possível citar Radomes / filtros para estações 5G, pois as FSS impressas em 3D podem atenuar como elementos de radome ou filtros seletivos que deixam passar ou rejeitam a banda de 3,5 GHz, controlando acoplamento e interferência em estações base. Outra aplicação seria o uso de Superfícies seletivas adicionadas a elementos arquitetônicos (janelas, painéis ou divisórias) onde permitem selecionar passagem/atenuação de sinais em 3,5 GHz — útil para melhorar cobertura interna ou proteger ambientes sensíveis a interferência.

Em comparação com FSS fabricadas em PCB, a utilização da manufatura aditiva, adiciona as possibilidades de design eficiente em termos de custo, modelagem precisa e fácil fabricação de estruturas não planar. A impressão 3D proporciona uma liberdade no design de

estruturas em terceira dimensão não apenas para FSS, mas também, para o desenvolvimento de filtros e antenas aplicados nas mais diversas áreas.

6.1. TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade do trabalho propõe-se o desenvolvimento de novas pesquisas, como, por exemplo:

- Caracterização dos materiais utilizando novas técnicas;
- Caracterização de novos tipos de filamentos 3D;
- Investigar novas estruturas de FSS impressas com filamentos 3D, como por exemplo, estruturas com curvaturas;
- Construção de filtros com filamentos 3D.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Cavalcante, Gustavo Araújo. Desenvolvimento de Circuitos Planares sobre substratos têxteis. 2014. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- [2] Duarte, Mychael Jales. Análise e design de estruturas 2,5D de superfícies seletivas de frequência para aplicações em sistemas modernos de comunicações sem fio. 2019. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.
- [3] R. Sadaf Anwar e H. Ning, "Frequency selective surfaces: A review," *Applied Sciences*, p. 1689, 2018.
- [4] I. G. Lee e I. P. Hong, "3D Frequency Selective Surface for Stable Angle of Incidence," *Electronics Letters*, pp. 423-424, 2014.
- [5] M. Li, J. Liu, Z. Hu and Y. Yang, "3D Broadband FSS with Through Holes and Low Profile for UHF and SHF Applications," 2022 *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Sydney, Australia, 2022, pp. 443-444, doi: 10.1109/ISAP53582.2022.9998777.
- [6] V. P. Silva Neto, M. J. Duarte, A. G. D'Assunção, "Full-Wave Analysis of Stable Cross Fractal Frequency Selective Surfaces Using an Iterative Procedure Based on Wave Concept", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2015, Article ID 401210, 7 pages, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/401210>.
- [7] Clarissa de Lucena Nóbrega, Marcelo Ribeiro da Silva, Paulo Henrique da Fonseca Silva, Adaildo Gomes D'Assunção, Gláucio Lima Siqueira, "Simple, Compact, and Multiband Frequency Selective Surfaces Using Dissimilar Sierpinski Fractal Elements", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2015, Article ID 614780, 5 pages, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/614780>.
- [8] J. H. Barton, C. R. Garcia, E. A. Berry, R. Salas and R. C. Rumpf, "3-D Printed All-Dielectric Frequency Selective Surface With Large Bandwidth and Field of View," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 3, pp. 1032-1039, March 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2388541.
- [9] Coutinho, Ianes Barbosa Grécia, "Desenvolvimento de superfícies seletivas em frequência associando as geometrias dipolos cruzados e matrioska", 2020.

- [10] B. Sanz-Izquierdo and E. A. Parker, "3D printed FSS arrays for long wavelength applications," *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, The Hague, Netherlands, 2014, pp. 2382-2386, doi: 10.1109/EuCAP.2014.6902296.
- [11] Y. Arbaoui, V. Laur, A. Maalouf and P. Queffelec, "3D printing for microwave: Materials characterization and application in the field of absorbers," *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Phoenix, AZ, USA, 2015, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWSYM.2015.7166769.
- [12] J. H. Barton, C. R. Garcia, E. A. Berry, R. Salas and R. C. Rumpf, "3-D Printed All-Dielectric Frequency Selective Surface With Large Bandwidth and Field of View," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 3, pp. 1032-1039, March 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2388541.
- [13] R. Kronberger and V. Wienstroer, "3D-printed FSS using printing filaments with enclosed metal particles," *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, Singapore, 2017, pp. 808-811, doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293245.
- [14] K. G. Kjelgård, D. T. Wisland and T. S. Lande, "3D Printed Wideband Microwave Absorbers using Composite Graphite/PLA Filament," *2018 48th European Microwave Conference (EuMC)*, Madrid, Spain, 2018, pp. 859-862, doi: 10.23919/EuMC.2018.8541699.
- [15] S. Ghosh and S. Lim, "A Miniaturized Bandpass Frequency Selective Surface Exploiting Three-Dimensional Printing Technique," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 1322-1326, July 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2915048.
- [16] R. Mi *et al.*, "3D Printed Electromagnetic Absorber Built with Conductive Carbon-filled Filament," *2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*, Raleigh, NC, USA, 2021, pp. 266-271, doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559309.
- [17] R. A. Mellita, S. S. Karthikeyan and P. Damodharan, "Additively Manufactured Conformal All-dielectric Frequency Selective Surface," *2020 50th European Microwave Conference (EuMC)*, Utrecht, Netherlands, 2021, pp. 772-775, doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9338224.
- [18] S. Qiu, Q. Guo and Z. Li, "Tunable Frequency Selective Surface Based on a Sliding 3D-Printed Inserted Dielectric," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 19743-19748, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3054434.
- [19] Vásquez-Peralvo JA, Tamayo-Domínguez A, Pérez-Palomino G, Fernández-González JM, Wong T, "3D Inductive Frequency Selective Structures Using Additive Manufacturing and Low-Cost Metallization". *Sensors (Basel)*. 2022 Jan 11;22(2):552. doi: 10.3390/s22020552.

- [20] S. Li, P. Njogu, B. Sanz-Izquierdo, S. Gao and Z. Chen, "Reconfigurable FSS Based on Movable 3D-Printed Metal-Dielectric Grids," *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Florence, Italy, 2023, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133112.
- [21] B. A. Munck, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [22] T. K. Wu, *Frequency-Selective Surface and Grid Array*, New York: Wiley, 1995.
- [23] CAMPOS, Antônio Luiz Pereira de Siqueira. *Superfícies Seletivas em Frequência: Análise e Projeto*. Natal: IFRN Editora, 2009, 196 p.
- [24] D. B. Brito, L. M. Araújo, A. G. D'Assunção and R. H. C. Maniçoba, "A Minkowski fractal Frequency Selective Surface with high angular stability," *2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, Rio de Janeiro, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/IMOC.2013.6646577.
- [25] Sarika, Kumar, R., Tripathy, M. R., & Ronnow, D. (2017). "Fractal frequency selective surface based band stop filters for X-band and Ku-band applications." *2017 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication & Automation (ICACCA)* (Fall). doi:10.1109/icaccac.2017.8344692.
- [26] Da Silva, M. R., Nóbrega, C. de L., Silva, P. H. da F., & D'Assunção, A. G. (2012). "Dual-polarized band-stop FSS spatial filters using vicsek fractal geometry." *Microwave and Optical Technology Letters*, 55(1), 31– 34, January 2013.
- [27] Da Silva, M. R., Nóbrega, C. de L., Silva, P. H. da F., & D'Assunção, A. G. (2014). "Optimization of FSS with Sierpinski island fractal elements using population-based search algorithms and MLP neural network." *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(4), 827– 831. doi:10.1002/mop.28214.
- [28] André Nascimento da Silva, *Caracterização de FSS com Geometria em Forma de U*, Dissertação de mestrado do IFPB, João pessoa – PB, abril 2014.
- [29] Pereira, Felipe Di Stefano. *Manufatura Aditiva: barreiras e oportunidades para a aplicação na indústria brasileira*. 2022. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2022.
- [30] PLA tudo o que você precisa saber sobre o filamento PLA, 2022, disponível em <https://3dlab.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamento-pla/>.
- [31] BRITO*, G. F. et al. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, Campina Grande – PB, p. 127-139, set. 2011. Disponível

em: <<http://file:///C:/Users/Marcos/Downloads/222-1014-1-PB.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

[32] 3D Printer Filament Types Guide of 2017. Disponível em: <<https://www.allthat3d.com/3d-printer-filament/>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

[33] Besko, Marcos a; Bilyk, Claudio b; Sieben, Priscila Gritten, Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D, Gest. Tecnol. Inov. Vol.01 n.3, 2017.

[34] Resina ABS Acrilonitrila Butadieno Estireno: características, fórmula, aplicações, 2021, disponível em <https://www.plastico.com.br/acrilonitrila-butadieno-estireno-abs-caracteristicas-e-mais-informacoes/>.

[35] PETG: o que é e para que serve? 2024, disponível em <https://www.plastico.com.br/petg-o-que-e-e-para-que-serve/#6>.

[36] LIMA, ÂNGELA MARIA FERREIRA. Estudo da Cadeia Produtiva do Polietileno Tereftalato (pet) na Região Metropolitana de Salvador como Subsídio para Análise do Ciclo de Vida. 2001. 94 p. Monografia (Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria - UFBA) - UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, Sal, 2001.

[37] Entenda como funciona a impressão 3D em resina, 2020, disponível em <https://www.makerhero.com/blog/impressao-3d-em-resina/>.

[38] VOLPATO, N., Ed. Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações. EDGARD BLUCHER, 1ª edição, 2007.

[39] Yaw, K.C. *Measurement of Dielectric Material Properties—Application Note*; RAC0607-0019_1_4E; Rohde & Schwarz Report: Munich, Germany, 2012.

[40] Keysight Technologies. *Measuring Dielectric Properties Using Keysight's Materials Measurements Solutions*, Brochure, Literature number 5991-2171EN, 2023. Disponível em: <https://www.keysight.com/br/pt/assets/7018-03896/brochures/5991-2171.pdf>. Acesso em: 22 out. 2024.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Folha de Assinatura

Assunto:	Folha de Assinatura
Assinado por:	Thalisson Luz
Tipo do Documento:	Folha
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Thalisson de Souza da Luz, DISCENTE (20211430031) DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES - JOÃO PESSOA, em 16/09/2025 17:53:09.

Este documento foi armazenado no SUAP em 16/09/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1611465
Código de Autenticação: 1a7fb657ed



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850

Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)

CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC Thalisson

Assunto:	TCC Thalisson
Assinado por:	Gustavo Cavalcante
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Documento Original

Documento assinado eletronicamente por:

- Gustavo Araujo Cavalcante, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCSTST-JP , em 22/09/2025 13:41:41.

Este documento foi armazenado no SUAP em 22/09/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1617416
Código de Autenticação: a34180fc27

