

ANTONIO MENDES DE OLIVEIRA NETO

**Desenvolvimento de dispositivos de micro-ondas usando técnicas de
manufatura aditiva**

São Paulo

2023

ANTONIO MENDES DE OLIVEIRA NETO

**Desenvolvimento de dispositivos de micro-ondas usando técnicas de
manufatura aditiva**

Versão corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Ciências.

São Paulo

2023

ANTONIO MENDES DE OLIVEIRA NETO

**Desenvolvimento de dispositivos de micro-ondas usando técnicas de
manufatura aditiva**

Versão corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração:
Microeletrônica

Orientador:
Prof. Dr. João Francisco Justo Filho

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador

São Paulo, 11 de setembro de 2023.

Assinatura do autor: _____



Assinatura do orientador: _____



Catálogo-na-publicação

de Oliveira Neto, Antonio Mendes

Desenvolvimento de dispositivos de micro-ondas usando técnicas de manufatura aditiva / A. M. de Oliveira Neto -- versão corr. -- São Paulo, 2023.
150 p.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1. Tecnologias de micro-ondas 2. Manufatura aditiva 3. Transmissão de energia I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II. t.

Dedico este trabalho ao meus pais, Antonio Mendes de Oliveira Filho e Maria Josefa Veiga de Oliveira, pelo amor e dedicação de toda uma vida. Agradeço a minha esposa Ester Segura Fernandes e minhas filhas por sempre me apoiarem e entenderem a minha necessidade de sempre continuar estudando.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. João Francisco Justo Filho, por sua orientação neste trabalho e compreensão nos momentos difíceis que apareceram pelo caminho.

Ao professor Dr. Alexandre Maniçoba de Oliveira, pela amizade e auxílio na execução deste trabalho.

Ao Dr. Wesley Beccaro, pelo auxílio nas medidas laboratoriais e excelentes ideias sobre a condução deste trabalho.

Aos professores da banca de qualificação pelas valorosas contribuições ao meu trabalho.

Aos professores do programa de Pós-Graduação da Engenharia Elétrica da Escola Politécnica pelo ensino e motivação.

Aos servidores da secretaria da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo atendimento prestado e excelente suporte.

Aos colegas do laboratório Maxwell e do IFSP pelo auxílio e amizade.

Ao IFSP por permitir meu afastamento para a execução deste trabalho.

A todos os meus colegas, amigos e familiares pelo auxílio e apoio na execução deste trabalho.

RESUMO

Mendes de Oliveira Neto, A. **Desenvolvimento de dispositivos de micro-ondas usando técnicas de manufatura aditiva**. 2023, 150p. Tese (doutorado) – Programa de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2023.

Metamateriais dielétricos foram utilizados na última década para a produção de dispositivos na área de micro-ondas e ondas milimétricas, incluindo pesquisa e produção de lentes dielétricas, dispositivos de transição entre seções e absorvedores. Na área de circuitos, esses materiais são explorados para a produção de substratos para filtros, acopladores, divisores, ou qualquer circuito que necessite de variação da constante dielétrica (ϵ_r) do substrato. As técnicas atuais de construção de metamateriais dielétricos incluem a combinação de materiais com ϵ_r distintos, com grandes variações nos valores de ϵ_r ao longo do substrato. A produção de substratos com espaços vazios, como furos, também permite variar o gradiente dielétrico do material de forma gradual. Em tecnologias de manufatura aditiva, como a impressão 3D, diversos estudos relataram a produção de metamateriais dielétricos com intercalação de ar, através de padrões hachurados. Este trabalho propõe uma nova técnica envolvendo processos de impressão 3D, que são capazes de misturar materiais com ϵ_r diferentes. Com isso, é possível produzir gradientes dielétricos sólidos sem a presença de furos, fornecendo uma nova abordagem para a produção deste tipo de dispositivo. Para confirmar a funcionalidade da técnica, foi produzida uma lente dielétrica com ação focalizadora, com ganhos de até 1,98 dBi em campo distante. Este trabalho também demonstrou que é possível incluir as geometrias internas para produzir fenômenos físicos de difração, refração e reflexão semelhantes aos produzidos pelas geometrias externas na forma de padrões internos, que podem ser incluídos como parâmetros de design no desenvolvimento de dispositivos de RF. Foi desenvolvido um protótipo de um absorvedor que utilizou um conjunto interno de geometrias com fractais. O protótipo foi medido e apresentou resultados compatíveis com sua versão sólida, utilizando uma menor quantidade de material na sua construção e com absorções superiores a 99,9% em diversas frequências. Neste trabalho foi explorado como filamentos condutivos podem ser utilizados na produção de protótipos de dispositivos construídos a partir de técnicas de impressão 3D. Circuitos de transferência de energia podem ser explorados utilizando-se as técnicas desenvolvidas nesta pesquisa. Um circuito de transferência capacitiva de energia foi modelado, seu protótipo foi impresso e suas propriedades de transferência de energia foram analisadas. Foi identificado que a transferência de energia capacitiva pode ser conseguida utilizando-se apenas de materiais e tecnologias de impressão 3D. O trabalho finaliza apresentando novas oportunidades de pesquisa utilizando as técnicas desenvolvidas no trabalho.

Palavras-chave: Gradiente dielétrico. Manufatura aditiva. Lente dielétrica. Absorvedores. Filamentos condutivos. Transferência capacitiva de energia.

ABSTRACT

Mendes de Oliveira Neto, A. **Development of microwave devices using additive manufacturing techniques**. 2023, 150p. Tese (doutorado) – Programa de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2023.

Dielectric metamaterials have been used in the last decade for the production of devices in the microwave and millimeter wave area, including research and production of dielectric lenses, transition devices between sections and absorbers. In the area of circuits, these materials are explored for the production of substrates for filters, couplers, dividers, or any circuit that requires variation of the dielectric constant (ϵ_r) of the substrate. Current techniques for building dielectric metamaterials include the combination of materials with distinct ϵ_r with large variations in the values of ϵ_r along the substrate. The production of substrates with voids, such as holes, also allows the dielectric gradient of the material to be varied gradually. In additive manufacturing technologies, such as 3D printing, several studies have reported the production of dielectric metamaterials with air intercalation, through hatching patterns. This work proposes a new technique involving 3D printing processes, which are able to mix materials with different ϵ_r . With this, it is possible to produce solid dielectric gradients without the presence of holes, providing a new approach for the production of this type of device. To confirm the functionality of the technique, a dielectric lens with a focusing action was produced, with gains of up to 1.98 dBi in the far field. This work also demonstrated that it is possible to include internal geometries to produce physical phenomena of diffraction, refraction and reflection similar to those produced by external geometries in the form of internal patterns, which can be included as design parameters in the development of RF devices. A prototype of an absorber was developed that used an internal set of geometries with fractals. The prototype was measured and showed results compatible with its solid version, using a smaller amount of material in its construction and with absorptions greater than 99.9% at different frequencies. In this work, it was explored how conductive filaments can be used in the production of prototype devices built using 3D printing techniques. Energy transfer circuits can be explored using the techniques developed in this research. A capacitive energy transfer circuit was modeled, its prototype was printed and its energy transfer properties were analyzed. It has been identified that capacitive energy transfer can be achieved using only 3D printing materials and technologies. The work ends by presenting new research opportunities using the techniques developed in the work.

Keywords: Dielectric gradient. Additive manufacturing. Dielectric lens. Absorbers. Conductive filaments. Capacitive energy transfer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquematizada da estrutura capaz de curvar o feixe de micro-ondas em 45°	29
Figura 2 - Esquema de uma transição eletromagnética que utiliza furos para variação dielétrica.	32
Figura 3 - Esquema da lente dielétrica para planificação de frente de ondas esféricas.	33
Figura 4 - Esquema demonstrando a técnica atual de variação dielétrica com intercalação de material com ar (a) e a novo método proposto (b).	37
Figura 5 - Representação esquematizada de uma cabeça de impressão com dois bicos.	46
Figura 6 - Representação esquematizada de uma cabeça de impressão com bico de mistura de filamentos e de sua câmara interna.	47
Figura 7 - Bico de impressão <i>Diamond HotEnd</i> (a) e exemplo ampliado de fio produzido pela saída do bico (b).	48
Figura 8 - (a) Caixa de tração com redução de 3:1 nos motores e dois tracionadores de filamentos. (b) Esquema interno da caixa de redução com os eixos tracionadores.	49
Figura 9 - Esquema de sonda coaxial para caracterização dielétrica de amostras sólidas (a) ou líquidas (b).	52
Figura 10 - Esquema de um equipamento para caracterização dielétrica utilizando guia de onda.	53
Figura 11 - Esquema de um equipamento para caracterização dielétrica utilizando antenas do tipo corneta.	54
Figura 12 - Esquema de um ressonador planar para caracterização dielétrica.	55
Figura 13 - Permissividade relativa do ABSg em função da altura da camada impressa.	60
Figura 14 - Padrões de preenchimento utilizados nos testes de impressão. “ <i>Rectilinear</i> ” (a), “ <i>Archimedian Chords</i> ” (b) e “ <i>Concentric</i> ” (c).	61
Figura 15 - (a) Fotos de algumas microlinhas produzidas para se medir o ϵ_r dos substratos. (b) Ampliação da microlinha com 75% de ABSg na mistura.	63

Figura 16 - Permissividade relativa (linha azul) e tangente de perda (linha laranja) devido à mistura de ABS natural e ABSg.....	64
Figura 17 – Esquema simplificado do funcionamento de uma antena (a). Esquema simplificado do funcionamento de uma antena com lente dielétrica (b). 67	67
Figura 18 – Esquema simplificado do funcionamento da lente dielétrica.	69
Figura 19 - Processo de modelagem do conjunto LAVA. A disposição dos conjuntos está em ordem cronológica da esquerda para direita de cima para baixo.	70
Figura 20 - Modelo da LAVA final projetado no simulador eletromagnético. A parte amarela é a antena e as partes em azul, verde, roxo e vermelho são componentes da lente.	72
Figura 21 - Ganho simulado (dBi) em função da frequência (GHz) no campo distante (LAVA e AVA).....	73
Figura 22 – Parâmetro $ S_{11} $ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para LAVA e AVA.	74
Figura 23 – Esquema do circuito utilizado para as medidas do diagrama de radiação.	75
Figura 24 - Protótipo impresso da LAVA.	76
Figura 25 - Parâmetro S_{11} simulado e medido para LAVA e AVA.....	77
Figura 26 - Diagramas de radiação simulados (linhas azuis) e medidos (símbolos laranja) no plano xz para: (a) LAVA a 1,75 GHz, (b) AVA a 1,75 GHz, (c) LAVA a 2,00 GHz, (d) AVA a 2,00 GHz, (e) LAVA a 2,25 GHz e (f) AVA a 2,25 GHz.	78
Figura 27 - Distribuição do campo elétrico em dB no plano xz a 2,25 GHz para LAVA (a) e AVA (b).	79
Figura 28 - Esquema da lente focalizadora proposta por Mei, Bai e Cui em 2010....	80
Figura 29 - Esquema da absorvedor proposto por Jiang <i>et al.</i> (2018).	86
Figura 30 - a) Representação esquematizada do absorvedor utilizando a curva de Hilbert desenvolvida por Petroff <i>et al.</i> b). Célula de repetição que foi utilizada na construção do absorvedor.....	87
Figura 31 - (a) Célula de repetição do absorvedor proposto por Lleshi <i>et al.</i> As camadas cinzas são de PLA convencional e as camadas mais claras são de PLA condutivo. (b) Representação esquematizada do absorvedor proposto por Lleshi <i>et al.</i> em seu trabalho.	88

Figura 32 - Foto do protótipo produzido por Lleshi et al. em seu trabalho sobre absorvedores com materiais intercalados.	89
Figura 33 - Possíveis interações de difração, refração e reflexão em pirâmides sólidas	91
Figura 34 - Possíveis caminhos percorridos internamente pela onda EM, considerando-se apenas os fenômenos de refração. (a) Parte oca com mesma orientação da pirâmide. (b) Parte oca com orientação invertida em relação a pirâmide.	92
Figura 35 - Triângulo de Sierpiński para $n=0$ (a), $n=1$ (b), $n=2$ (c) e $n=3$ (d). A cor verde representa a parte preenchida e a branca representam os triângulos menores que são inseridos de forma a remover parte de seu interior do triângulo principal.	93
Figura 36 - Possíveis interações de difração, refração e reflexão em pirâmides com padrões internos com intercalação de ar e material.	94
Figura 37 - Representação esquematizada de uma versão 3D de uma pirâmide inspirada no fractal do triângulo de Sierpiński para $n = 1$ (a), $n = 2$ (b), $n = 3$ (c) a quantidade de material que é removido para $n = 3$	95
Figura 38 - Versão esquematizada do absorvedor simulado no CST de 3ª ordem.	97
Figura 39 - Gráfico do parâmetro $ S_{11} $ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para absorvedores piramidais equiláteros com fractal $n = 3$ e aresta 80 mm para várias medidas de altura da base (h) e onda EM incidente de 0° em relação a normal.	98
Figura 40 - Gráfico do parâmetro $ S_{11} $ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para absorvedores piramidais equiláteros sólidos com aresta (e) de 40, 60 e 80 mm com base (h) de 20 mm e onda EM incidente de 0° em relação a normal.	99
Figura 41 - Gráfico do parâmetro $ S_{11} $ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para absorvedores piramidais equiláteros utilizando o fractal de Sierpiński com $n = 3$ com aresta (e) de 40, 60 e 80 com base (h) de 20 mm e onda EM incidente de 0° em relação a normal.	100
Figura 42 - Gráfico do parâmetro $ S_{11} $ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para absorvedores piramidais equiláteros utilizando o fractal de Sierpiński com $n = 3$, versão com pirâmide sólida e versão com pirâmide oca com	

casca de 4 mm, com $e = 40$ mm, $h = 20$ mm e onda EM incidente de 0° em relação a normal.....	101
Figura 43 - Circuito equivalente ao absorvedor piramidal equilátero que utiliza o fractal de Sierpiński com $n = 3$	102
Figura 44 - Gráfico do parâmetro $ S_{11} $ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para absorvedores piramidais equiláteros utilizando o fractal de Sierpiński com $n = 3$, e seu circuito equivalente.....	103
Figura 45 - Protótipo dos absorvedores impressos ($e = 40$ mm, $h = 20$ mm): (a) versão sólida, (b) com fractais $n = 3$ e (c) a corte transversal em 20mm exibindo as partes ocas do fractal $n = 3$	105
Figura 46 - (a) Esquema do arranjo utilizado para as medidas experimentais. (b) Fotografia do <i>setup</i> experimental.....	106
Figura 47 - Medidas de absorção (% e dB) em função da frequência (GHz) para os ângulos de incidência θ em 30° (a) e em 50° (b) para os absorvedores com $e = 40$ mm e $h = 20$ mm, para as versões solidas e com fractais $n = 3$	107
Figura 48 - Absortividade medida (dB) em função da frequência (GHz) para ângulos de incidência de 0° a 60° em relação a normal em passos de 10° para absorvedores com $e = 40$ mm e $h = 20$ mm, para pirâmides solidas (a) e pirâmides com fractal ($n = 3$) (b).....	108
Figura 49 – Esquema simplificado de um circuito CPT (a) e IPT (b).....	112
Figura 50 – Foto do protótipo do circuito apresentado por Sinha, Kumar e Afridi. ...	113
Figura 51 – Esquema simplificado em circuito CPT proposto por Sodagar e Amiri para uso em implantes biomédicos.	113
Figura 52 – Esquema simplificado de circuitos CPT com rede de compensação com indutores. Indutor apenas no circuito primário (a). Indutor em série no primário e secundário (b). Indutor em série no primário e em paralelo no secundário (c). r_p e r_s são representações das perdas resistivas nos circuitos primário e secundário.....	115
Figura 53 – Esquema simplificado de circuitos CPT com rede de compensação utilizando indutor e capacitor, ou LC (a) e com indutor, capacitor e indutor, ou LCL (b).	116
Figura 54 – Foto do equipamento utilizado na análise da impedância e capacitância do capacitor de placas paralelas montado para o teste.	117

Figura 55 – Esquema de um analisador LRC para análise da capacitância utilizando um capacitor de placas paralelas.	117
Figura 56 – Esquema completo de um circuito CPT.	120
Figura 57 – Possíveis formas de disposição de um circuito CPT fixo com 4 placas paralelas.....	120
Figura 58 – Primeira versão otimizada do circuito CPT com dois conjuntos de placas separadas.....	122
Figura 59 – Corrente simulada em função da frequência para as 3 configurações propostas para análise inicial dos circuitos CPT.	123
Figura 60 – Segunda versão simulada do circuito CPT. (a) visão externa e (b) visão interna das placas condutivas.	124
Figura 61 – Redes de compensação testadas para melhoria do dispositivo CPT em ordem cronológica.....	125
Figura 62 – Corrente simulada em função da frequência circuito CPT finalizado com a rede de compensação.....	126
Figura 63 – Lacuna produzida por problemas de adesão entre o PLA e PLAc com velocidades de 35 mm/s de impressão.	127
Figura 64 - Protótipo do dispositivo de CPT impresso. (a) vista superior, (b) vista lateral esquerda e (c) vista lateral direita.	129
Figura 65 – Setup utilizando durante o processo de medição do protótipo do dispositivo CPT fabricado.	130
Figura 66 – Ganho (em dB) da tensão de saída em relação a tensão de entrada para o protótipo do circuito CPT impresso e para sua versão simulada.....	131
Figura 67 - Representação esquematizada do substrato proposto por Aghayari <i>et al.</i> (2018) em seu trabalho.	144
Figura 68 - Representação esquematizada do substrato proposto por Silvestri <i>et al.</i> (2016) em seu trabalho.	145
Figura 69 - Representação esquematizada do isolador elétrico proposto por Li <i>et al.</i> (2019).....	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS EM PORTUGUÊS

ABS	Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno
ABSG	ABS com grafite
AVA	Antena Antipodal Vivaldi
CPT	Transferência capacitiva de energia
DMM	Metamaterial dielétrico
ESD	Descarga Eletrostática
FDM	Modelagem por Deposição Fundida
FFF	Fabricação por filamento fundido
GRIN	Índice Graduado
IPT	Transferência indutiva de energia
LAVA	Conjunto Lente e Antena Antipodal Vivaldi
PLA	Ácido Polilático
PLAc	Ácido Polilático com grafite (PLA condutivo)
PVP	Polivinilpirrolidona
RF	Radiofrequência
UWB	Banda ultra larga
VNA	Analisador Vetorial de Rede

LIST OF ABBREVIATIONS AND ACRONYMS IN ENGLISH

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ABSG	ABS with graphite
AVA	<i>Antipodal Vivaldi Antenna</i>
CPT	Capacitive Power Transfer
DMM	Dielectric Metamaterial
ESD	<i>Electrostatic Discharge</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
IPT	Inductive Power Transfer
GRIN	<i>Graded Index</i>
LAVA	<i>Lens Antipodal Vivaldi Antenna</i>
PLA	<i>PolyLactic Acid</i>
PLAc	<i>PolyLactic Acid</i> with graphite (Conductive PLA)
PVP	Polyvinylpyrrolidone
RF	Radio Frequency
UWB	<i>Ultra-Wide Band</i>
VNA	Vector Network Analyzer

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Permissividade da região analisada
ε_1	Permissividade do material 1 na região analisada
f_1	Fração do volume do material 1 na região analisada
ε_2	Permissividade do material 2 na região analisada
f_2	Fração do volume dos furos na região analisada
n	Índice de refração ou número da frequência de ressonância utilizada
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
ε_r	Permissividade elétrica relativa
$\tan \delta$	Tangente de perdas
f_n	Frequência de ressonância utilizada (onde n é um número ímpar)
L_{stub}	Comprimento do toco do ressonador
ε_{eff}	Constante dielétrica efetiva
c	Velocidade da luz
ΔL	Comprimento adicional
H	Altura do substrato da microlinha do ressonador
W	Largura do toco e da microlinha
T	Espessura da fita de cobre condutiva
λ_g	Comprimento de onda na microlinha
α	Atenuação total
α_c	Atenuação causada pelo condutor
α_d	Atenuação causada por perdas dielétricas no substrato
v_p	Velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio
A	Absortividade ou capacidade de absorção
R	Reflexão
T	Transmissão
e_d	Comprimento da aresta da camada dielétrica no circuito CPT
h_d	Altura da camada dielétrica no circuito CPT
w_c	Largura da placa condutiva no circuito CPT

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivos	24
1.1.1 Uma nova técnica para variação do gradiente dielétrico durante processos envolvendo impressões 3D de objetos por FDM	25
1.1.2 Aplicação da técnica no desenvolvimento de um dispositivo funcional com variação dielétrica	25
1.1.3 Exploração de padrões internos como parâmetros de design na produção de absorvedores	26
1.1.4 Explorando os processos de impressão 3D utilizando filamentos condutivos na produção de dispositivos de transferência capacitiva de energia	26
1.2 Organização deste trabalho	26
2. TÉCNICAS E MATERIAIS RELACIONADOS PARA A VARIAÇÃO DIELÉTRICA	28
2.1 Técnicas para variação do gradiente dielétrico	28
2.1.1 Variação do gradiente dielétrico utilizando materiais cerâmicos	28
2.1.2 Variação do gradiente dielétrico utilizando líquidos.....	29
2.1.3 Variação do gradiente dielétrico através de furos	29
2.2 Alteração das características dielétricas de materiais para utilização em processos de prototipagem rápida como a impressão 3D	35
3. PROPOSTA DE ESTUDO	37
3.1 Desenvolvimento de uma técnica para variação da permissividade elétrica do material extrudado durante a impressão do objeto	38
3.2 Caracterização de objetos impressos com a técnica de mistura de filamentos...38	
3.3 Desenvolvimento de uma aplicação que faça uso da técnica de variação dielétrica	39
3.4 Desenvolvimento de uma aplicação que inclua padrões internos como parâmetros de <i>design</i>	39
3.5 Desenvolvimento de uma aplicação que utilize transferência capacitiva utilizando filamentos condutivos	40
4. DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA PARA VARIAÇÃO DIELÉTRICA DURANTE O PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D	42
4.1 Escolha do material.....	42

4.2 Desenvolvimento de uma impressora 3D FDM que trabalhe com impressões por mistura de filamentos	44
4.2.1 Cabeça de impressão.....	45
4.2.2 Programa de fatiamento	50
4.3 Impressão e caracterização de substratos	51
4.4 Configuração do processo de impressão utilizando ABS e ABSg.....	57
4.5 Resultados da caracterização do ABSg	59
4.6 Resultados da caracterização do processo de mistura de filamentos com ABS e ABSg.....	62
5. UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE IMPRESSÃO POR MISTURA DE FILAMENTOS EM UMA APLICAÇÃO REAL	66
5.1 Desenvolvimento da lente focalizadora utilizando gradiente dielétrico.....	66
5.2 Impressão e caracterização da lente dielétrica	74
6. DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO QUE INCLUA OS PADRÕES INTERNOS COMO PARÂMETROS DE DESIGN	82
6.1 Técnicas e materiais usados para produção de absorvedores	82
6.1.1 Tipos de materiais utilizados na produção de absorvedores.....	84
6.1.2 Influência da geometria e formas de medir sua eficiência.....	85
6.2 Geometrias como parâmetros de <i>design</i>	89
6.3 Modelagem conceitual.....	90
6.4 Modelagem eletromagnética e simulação	96
6.5 Produção dos absorvedores.....	104
6.6 Procedimentos de medição e análise dos resultados	105
7. DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS QUE UTILIZEM FILAMENTOS CONDUTIVOS	110
7.1 Técnicas utilizadas para a transferência capacitiva de energia.....	111
7.2 A importância da rede de compensação	114
7.3 Caracterização dos materiais que serão utilizados nos processos de modelagem eletromagnética e impressão do protótipo	116
7.4 Modelagem conceitual do dispositivo CPT proposto.....	119
7.5 Modelagem eletromagnética e simulação	121
7.6 Produção do dispositivo CPT utilizando impressão 3D	127
7.7 Procedimentos de medição e análise dos resultados	129
8. CONCLUSÃO	133

REFERÊNCIAS.....	136
APÊNDICE A - PROPOSTAS DE NOVAS PESQUISAS UTILIZANDO OS FILAMENTOS E AS TÉCNICAS DESENVOLVIDAS NESTE TRABALHO.....	144
APÊNDICE B - TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE A EXECUÇÃO DESTA PESQUISA	149
APÊNDICE C - OPERAÇÃO DE IMPRESSORAS 3D QUE TRABALHAM COM MISTURAS DE FILAMENTOS	150

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos observados na última década, alavancados pelo desenvolvimento dos dispositivos móveis e pelo aumento expressivo de dispositivos baseados em Internet das Coisas (IoT), demandam o desenvolvimento contínuo de novos circuitos e tecnologias de radiofrequência (RF). A maioria destes novos dispositivos de RF devem ser compactos, leves e operarem especialmente na faixa de micro-ondas ou ondas milimétricas. Novos circuitos de micro-ondas podem ser desenvolvidos utilizando-se de materiais e métodos já existentes ou se explorando novos métodos de construção, novos materiais e adoção de novas técnicas, explorando novas propriedades ou novos *designs* de construção, tornando estes dispositivos cada vez mais acessíveis (GHAZALI *et al.*, 2017; MOSCATO *et al.*, 2016).

Nas pesquisas sobre novas propriedades e novos *designs*, a área de metamateriais tem se destacado pela busca de novas aplicações. Um metamaterial é obtido quando se combinam materiais com propriedades já conhecidas em conjunto com padrões espaciais que permitem alterar ou melhorar alguma propriedade do material. Como resultado, acaba-se obtendo um objeto com propriedades distintas do material de origem (LIU; ZHANG, 2011). Ao se aplicar os conceitos de metamateriais a materiais com propriedades dielétricas, torna-se possível construir dispositivos que exibam propriedades não encontradas na natureza, como, por exemplo, índices de refração negativos. Com isso, aumentam-se consideravelmente as possibilidades de configurações possíveis, diferentes das configurações existentes em dispositivos com índices de refração positivos, que podem ser exploradas no desenvolvimento de novas tecnologias (SHELBY; SMITH; SCHULTZ, 2001).

Os metamateriais dielétricos podem ser construídos com dois ou mais materiais com propriedades dielétricas distintas, normalmente dispostos em algum tipo de estrutura ou arranjo periódico. Uma estrutura comum é a intercalação de um determinado material com o ar atmosférico, através de pequenos furos, com diâmetros muito menores que o comprimento de onda (SHELBY; SMITH; SCHULTZ, 2001). Mei, Bai e Cui apresentaram em seu trabalho (MEI; BAI; CUI, 2010) um conjunto de dispositivos, que utilizavam a técnica de gradiente de índices de refração (*Graded Index* ou GRIN). Furos são dispostos de forma periódica em um substrato formando uma grade. A diferença nos diâmetros dos furos faz com que a permissividade elétrica relativa (ϵ_r) seja dada em função da quantidade de material e do ar presente nos furos

em determinada região do substrato, produzindo um gradiente de índices de refração. Com esta técnica foi produzido um dispositivo capaz de desviar a trajetória de uma onda eletromagnética na faixa do micro-ondas em 45° (MEI; BAI; CUI, 2010) sem o uso de nenhum tipo de reflexão. Utilizando-se da mesma técnica, Mei, Bai e Cui apresentaram outro dispositivo que foi utilizado como lente focalizadora do feixe de micro-ondas. Esse trabalho confirmou que a técnica é eficaz para criar um conjunto de gradientes dielétricos utilizando-se de intercalação de material com ar atmosférico através de arranjos periódicos (MEI; BAI; CUI, 2010).

Os processos de intercalação do gradiente dielétrico são eficazes, mas envolvem processos de manufatura subtrativa. A manufatura subtrativa ocorre quando se utilizam equipamentos para remover material de um determinado objeto, como furadeiras e equipamentos de desgastes. Trabalhos mais recentes (ANWAR; ABUFANAS; BANGERT, 2020; YI *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2016) incluíram o uso de técnicas de manufatura aditiva, que trabalham com deposição de material, como equipamentos de soldagem, processos de injeção ou extrusão, ou ainda processos de impressão 3D, que constroem objetos fazendo a deposição de material em forma de camadas, tornando possível a construção deste tipo de dispositivo utilizando um único processo de construção. A manufatura aditiva, como as tecnologias de impressão 3D, proporcionam versatilidade na construção de protótipos e dispositivos customizados em qualquer quantidade.

As diversas técnicas existentes na impressão 3D e os materiais que são empregados permitem controlar diversos parâmetros durante a construção das peças ou objetos. Estes parâmetros definem as propriedades físicas finais dos objetos impressos. Muitos desses parâmetros de impressão modificam as características mecânicas e/ou dielétricas dos objetos impressos. As propriedades físicas dos objetos produzidos por impressão 3D também são afetadas pelo tipo do material utilizado. Materiais com propriedades condutivas, magnéticas ou dielétricas podem ser utilizados em conjunto com os parâmetros de impressão, obtendo-se objetos com propriedades distintas do material de entrada (GHAZALI *et al.*, 2017). Diversos trabalhos, como o de Zhang *et al.* (2016), já haviam demonstrado que é possível reproduzir um gradiente dielétrico, através de filamentos com propriedades dielétricas e a utilização de padrões hachurados, intercalando ar em pequenos espaços com o material do filamento. Estes padrões podem ser reproduzidos com maior ou menor

grau de complexidade e em uma única etapa de produção, oferecendo maior liberdade de *design* na proposição de novos dispositivos e processos (ZHANG *et al.*, 2016).

O trabalho de Goulas *et al.* (GOULAS *et al.*, 2020) introduziu uma inovação em relação à pesquisa produzida por Zhang *et al.* (ZHANG *et al.*, 2016), que utilizou a mesclagem com ar e materiais de constante dielétrica mais altas, utilizando filamentos comerciais com $\epsilon_r = 10$ e padrões hachurados com pequenos furos para produzir regiões com gradientes dielétricos distintos do material de origem da impressão. Ao se trabalhar com filamento de constante dielétrica alta, foi possível construir uma lente com maior variação do gradiente dielétrico.

Outros trabalhos também exploraram o uso de padrões geométricos periódicos, produzindo outros tipos de interações com os materiais, demonstrando que a geometria é um parâmetro importante no desenvolvimento destes dispositivos. Trabalhos como o de Guo *et al.* (2017), Jiang *et al.* (2018) e Petroff *et al.* (2019) investigaram as propriedades de perda dielétrica de alguns materiais e de geometrias periódicas na construção de absorvedores. Quando geometrias periódicas em maior escala (maior que $1/10$ de λ) são aplicadas, fenômenos físicos de refração, difração e reflexão podem ser obtidos e utilizados para espalhar a onda eletromagnética. O espalhamento favorece sua absorção por um algum material de alta perda dielétrica. Isso é possível com o aumento do caminho percorrido pela onda dentro do material. Ao se investigar essa relação de caminho percorrido e fenômenos físicos, os autores produziram absorvedores de ondas eletromagnéticas mais eficientes e com menor custo (GUO *et al.*, 2017; JIANG *et al.*, 2018; LLESHI *et al.*, 2021; PETROFF *et al.*, 2019).

Além de aplicações em dispositivos de RF, as técnicas de manufatura aditiva por deposição de material, como as impressoras 3D, podem ser aplicadas na produção de outros tipos de dispositivos, explorando outras propriedades e materiais. Trabalhos recentes já comprovaram a eficiência de sensores construídos a partir de substratos impressos. Cho *et al.* (2019) apresentaram uma pesquisa sobre a produção de sensores para monitoramento de cultura de células em larga escala. Os sensores foram desenvolvidos a partir de substratos impressos em impressoras 3D, utilizando PLA (*PolyLactic Acid*) como filamento (CHO *et al.*, 2019).

Em outro trabalho, Leigh *et al.* (2012) confirmaram que é possível produzir em laboratório filamentos com propriedades customizadas em pequenas escalas e utilizar esses filamentos diretamente em impressoras 3D do tipo FDM (*Fused Deposition*

Modeling) para a produção de sensores (LEIGH *et al.*, 2012). Os substratos impressos com carga de carbono nos filamentos apresentaram propriedades condutivas, devido às adições de carbono, mostrando que é possível produzir sensores capacitivos flexíveis através de processos de impressão 3D. Outro trabalho (GRIFFITHS; LEIGH, 2019) apresentou uma técnica para a construção de sensores a partir da impressão 3D, onde foi utilizada uma impressora 3D com capacidade de trabalhar com dois tipos de filamentos simultaneamente. Os materiais dos filamentos foram depositados de forma controlada, produzindo objetos que apresentavam regiões com propriedades condutivas e regiões isolantes. O trabalho finaliza demonstrando que é possível construir sensores de baixo custo e que podem ser modelados para se encaixar em um local específicos sem a necessidade de utilização de eletrodos adicionais (GRIFFITHS; LEIGH, 2019).

Este trabalho se destaca pela exploração das tecnologias de impressão 3D na produção de dispositivos que possam ser utilizados em aplicações de RF, micro-ondas e na construção de dispositivos com capacidades condutivas.

A primeira proposta foi o desenvolvimento de uma nova técnica que permita alcançar os mesmos resultados obtidos pelas técnicas de variação dielétrica atuais sem utilizar intercalação com furos, produzindo objetos sólidos. A variação dielétrica foi produzida com misturas de materiais com duas constantes dielétricas distintas, uma alta e outra baixa. Para confirmar a eficiência da técnica, foi modelado, impresso e analisado um dispositivo que fez uso efetivo da técnica desenvolvida.

Com as técnicas de variação de gradiente dielétrico concluídas, foi explorado como outras propriedades físicas poderiam ser alteradas através de geometrias internas que foram pouco analisadas na literatura. Ao se investigar o uso de padrões internos, verificou-se que é possível reproduzir os mesmos fenômenos físicos de difração, refração e reflexão que normalmente são obtidos com produção de geometrias externas. Um protótipo de absorvedor que fez uso de padrões internos foi modelado e construído para demonstrar as possibilidades que os padrões internos podem produzir quando incluídos como parâmetros de *design* de dispositivos.

Com o intuito de investigar a utilização de filamentos condutivos na produção de dispositivos, um protótipo de um dispositivo de transferência capacitiva de energia foi modelado, impresso e seu desempenho foi analisado.

1.1 Objetivos

O foco deste trabalho é explorar técnicas de manufatura aditiva, em especial os processos envolvendo impressão 3D na produção de objetos que possam ser utilizados em aplicações de micro-ondas em dispositivos eletroeletrônicos em geral.

Diversas técnicas estão disponíveis atualmente para alcançar um gradiente dielétrico, com algum tipo de artifício de *design* para produzir uma mistura de ar e material para alteração da constante dielétrica na região de interesse e produzindo um gradiente variando a quantidade de furos ou poros para alterar a relação ar/material.

Um dos objetivos é apresentar uma nova técnica que permita produzir essa mesma variação da constante dielétrica sem utilizar furos ou qualquer tipo de intercalação ar/material com mistura de materiais ocorrendo no momento da impressão do objeto.

Logo após a técnica ser concluída, um protótipo funcional de um dispositivo será desenvolvido para confirmar que a técnica possui aplicação real.

Diversos tipos de dispositivos de micro-ondas, como absorvedores de ondas eletromagnéticas, dispositivos de transição de guias de ondas entre outros tipos de dispositivos, fazem uso de algum tipo de geometria externa para melhorar as propriedades presentes no material utilizado. Contudo existem poucos trabalhos colocando em evidência o uso de geometrias internas ou de padrões internos como opção no desenvolvimento destes tipos de dispositivos.

Com o objetivo de explorar as técnicas de impressão 3D para produção de dispositivos, será analisado como geometrias internas poderiam ser utilizadas para melhorar o desempenho de dispositivos de micro-ondas. Será construído um protótipo funcional que colocará em evidência o uso de padrões internos na melhoria de seu desempenho.

Um outro tópico muito explorado em tecnologias de impressão 3D é seu uso no desenvolvimento de objetos com características condutivas, como circuitos elétricos e eletrônicos que não possam ser construídos em uma placa de circuito convencional. Como último objetivo do trabalho, será explorado como filamentos condutivos poderiam ser utilizados no desenvolvimento de dispositivos de transferência de energia.

1.1.1 Uma nova técnica para variação do gradiente dielétrico durante processos envolvendo impressões 3D de objetos por FDM

O primeiro objetivo deste trabalho é apresentar uma nova técnica de produção de objetos, com constantes dielétricas específicas e/ou gradientes dielétricos sem utilizar intercalação de ar na sua composição. O principal desafio é achar um substituto para a técnica de mesclagem com ar. Existe um processo de impressão 3D, conhecido como mistura de filamentos, onde uma cabeça de impressão do tipo FDM recebe como entrada dois ou mais filamentos, produzindo um único fio com a combinação dos materiais da entrada e em proporções que dependerão da pressão exercida pelos tracionadores dos filamentos. Ao se utilizar filamentos com constante dielétrica diferentes, um com valor baixo e outro com valor alto, foi possível produzir um gradiente de valores de constante dielétrica na saída do bico de impressão, variando do valor do filamento de menor constante dielétrica, para o valor do filamento com maior constante dielétrica. Esses valores foram controlados livremente através dos parâmetros de impressão. Isto permitiu que partes do objeto fossem impressas com valores de constantes dielétricas específicas.

Para elaborar a nova técnica, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- a) Identificação de filamentos disponíveis no mercado que apresentassem a maior diferença entre suas constantes dielétricas;
- b) Identificação de componentes e construção de uma impressora 3D do tipo FDM, que fosse capaz de trabalhar com mistura de filamentos;
- c) Caracterização de amostras impressas pelos filamentos selecionados e das proporções de suas misturas, identificando os valores de constantes dielétricas obtidas e de suas tangentes de perdas.

1.1.2 Aplicação da técnica no desenvolvimento de um dispositivo funcional com variação dielétrica

O segundo objetivo deste trabalho é apresentar uma aplicação prática para a técnica desenvolvida de impressão 3D, projetando um dispositivo de micro-ondas que possa se beneficiar do uso de padrões dielétricos personalizados. Nesta proposta, será produzida uma lente dielétrica semelhante às existentes em trabalhos anteriores, mas que foi construída utilizando-se da técnica desenvolvida neste trabalho e que

possui diversas regiões com constantes dielétricas distintas. Com isso será possível demonstrado se a nova técnica de impressão de objetos com variação dielétrica durante o processo de impressão será factível e funcional.

1.1.3 Exploração de padrões internos como parâmetros de design na produção de absorvedores

Como terceiro objetivo será explorada a alta tangente de perdas ($\tan \delta$) do filamento de ABS com carga de carbono na produção de dispositivos absorvedores de micro-ondas utilizando técnicas de impressão 3D. O objetivo foi melhorar as propriedades absorvedoras adotando uma estratégia de *design* que colocasse em evidência parâmetros ainda não utilizados na literatura no desenvolvimento de absorvedores, como a exploração de padrões internos que permitam obter resultados semelhantes aos utilizados atualmente em absorvedores totalmente sólidos, adicionando novos parâmetros para o desenvolvimento destes dispositivos.

1.1.4 Explorando os processos de impressão 3D utilizando filamentos condutivos na produção de dispositivos de transferência capacitiva de energia

Como quarto objetivo deste trabalho, foi investigado o uso de filamentos com carga de carbono, que possuem alta condutividade, como é o caso do PLA condutivo com carga de carbono. Eles podem ser empregados na impressão e construção de dispositivos com capacidades condutivas. A proposta foi a construção de um dispositivo que utilizasse a capacidade condutiva destes filamentos na produção de um dispositivo de transferência capacitiva de energia. O dispositivo será modelado e seu protótipo será impresso e medido, tendo seus resultados apresentados.

1.2 Organização deste trabalho

O capítulo 1 apresenta a introdução deste trabalho e discussão dos problemas atuais e dos objetivos a serem alcançados. O capítulo 2 apresenta uma revisão das técnicas e os tipos de dispositivos que atualmente podem ser construídos com o uso de gradiente dielétricos. O capítulo 3 apresenta a proposta de estudo, com a descrição da nova técnica de variação do gradiente dielétrico com mistura de filamentos, métodos para caracterização dielétrica das peças impressas e aplicação para ser desenvolvida com a técnica. Também descreve o desenvolvimento de aplicações que

façam uso de padrões internos como parâmetros de design. O capítulo finaliza com a proposta para uma aplicação utilizando filamentos condutivos que ainda não havia sido explorada. O capítulo 4 apresenta a metodologia que é utilizada para a escolha dos filamentos para variação dielétrica e os critérios para o desenvolvimento e construção da impressora, assim como a caracterização das peças impressas, identificação das constantes dielétricas e tangente de perdas e resultados do processo de caracterização dielétrica dos substratos impressos.

O capítulo 5 apresenta o desenvolvimento de uma lente dielétrica com a técnica desenvolvida e apresenta os resultados do protótipo da lente impressa com gradiente dielétrico. O capítulo 6 apresenta a metodologia para desenvolvimento de um absorvedor que utiliza padrões internos como parâmetros de *design* e apresenta os resultados obtidos com o protótipo de um absorvedor. O capítulo 7 explora as técnicas de desenvolvimento e construção de um circuito utilizando filamentos condutivos. O circuito é um protótipo de um dispositivo de transferência capacitiva de energia, e analisa os resultados obtidos. O capítulo 8 apresenta a conclusão do trabalho e o capítulo 9 discute oportunidades de pesquisa identificadas para futura exploração das técnicas desenvolvidas neste trabalho, discutindo novas possibilidades e aplicações. O capítulo 10 apresenta uma relação de trabalhos publicados ao longo desta pesquisa.

2. TÉCNICAS E MATERIAIS RELACIONADOS PARA A VARIAÇÃO DIELÉTRICA

Este capítulo descreve as técnicas identificadas na literatura para a construção de substratos e placas de circuitos com variação dielétrica e como estas técnicas podem ser utilizadas na construção de alguns tipos de dispositivos.

2.1 Técnicas para variação do gradiente dielétrico

As técnicas atuais para variação dielétrica em substratos vêm da exploração do campo de pesquisa dos metamateriais. Metamateriais dielétricos são produzidos através da combinação de materiais com propriedades dielétricas já conhecidas, que são alteradas significativamente através de estruturas com padrões internos e/ou externos, fornecendo uma abordagem mais flexível no desenvolvimento de novas aplicações (AHMADI; MOSALLAEI, 2008).

2.1.1 Variação do gradiente dielétrico utilizando materiais cerâmicos

Uma técnica descrita por Yahiaoui *et al.* (2012) detalha a construção de um ressonador dielétrico, utilizando dois materiais distintos e uma estrutura periódica contendo pequenos discos sinterizados de óxido de titânio (TiO_2). Esse trabalho detalha como a estrutura periódica, formada por pequenos discos de TiO_2 , alteram as características dielétricas do substrato utilizado. Os discos funcionam como ressonadores e sua disposição periódica acaba por estabelecer uma permeabilidade magnética negativa, permitindo que o metamaterial funcione como ressonador em altas frequências (YAHIAOUI *et al.*, 2012).

Um outro trabalho, utilizando materiais cerâmicos, descreve um processo de construção de um metamaterial com pequenas estruturas periódicas em formato de cruz, sinterizadas com material cerâmico contendo bário, estrôncio, titânio, lantânio e magnésio. Esse trabalho descreve como a estrutura periódica é capaz de ser seletiva na passagem ou bloqueio de frequências na faixa do micro-ondas e como a estrutura pode ser reconfigurada para permitir a passagem ou bloqueio de outras frequências (LI *et al.*, 2016).

2.1.2 Variação do gradiente dielétrico utilizando líquidos

Alguns trabalhos utilizam a água como material base de suas estruturas periódicas. O trabalho de Stenishchev e Basharin descreve um método para construção de um protótipo de ressonadores dielétricos, utilizando uma estrutura periódica formada por tubos contendo água. A interação entre a onda eletromagnética e a estrutura periódica produziu ressonadores internos que foram eficazes em bloquear a passagem de determinados comprimentos de onda na faixa do micro-ondas. O trabalho também validou a relação existente entre a constante dielétrica dos materiais utilizados com sua geometria periódica utilizada e como sua interação foi responsável pelos resultados identificados (STENISHCHEV; BASHARIN, 2017).

Um outro trabalho conduzido por Yang *et al.* (2019) demonstrou como uma estrutura periódica contendo pequenos tubos com líquidos iônicos pode atuar como absorvedor. O trabalho descreve a estrutura e sua caracterização, demonstrando que o metamaterial foi capaz de funcionar como absorvedor na faixa de frequências entre 15 e 50 GHz (YANG *et al.*, 2019).

2.1.3 Variação do gradiente dielétrico através de furos

Mei, Bai e Cui (2010) desenvolveram diversas estruturas capazes de alterar o caminho percorrido por micro-ondas, incluindo lentes focalizadoras, utilizando-se de materiais e estruturas perfuradas (MEI; BAI; CUI, 2010). Uma representação esquematizada da estrutura proposta por Mei, Bai e Cui, capaz de curvar o feixe de micro-ondas em um ângulo de 45°, é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Representação esquematizada da estrutura capaz de curvar o feixe de micro-ondas em 45°.



Fonte: Próprio autor

Utilizando modelos matemáticos, simulações computacionais e construção de protótipos, Mei *et al.* (2010) comprovaram como os furos presentes de forma periódica em estruturas podem interagir com o material em seu entorno produzindo índices de refração personalizados ao longo da estrutura. Ao se variar o tamanho e a densidade dos furos realizados ao longo do corpo do objeto, diversas regiões passam a apresentar índices de refração distintos do material utilizado, o que produz um gradiente de índices de refração. Os objetos produzidos apresentam uma estrutura que é conhecida como GRIN, produzida pela variação dos diâmetros dos furos ao longo das estruturas. Também foi apresentada a relação entre a permissividade elétrica existente entre os furos e o material em uma determinada região, que pode ser dada pela equação 1.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 f_1 + \varepsilon_2 f_2 \quad (1)$$

Onde ε é a permissividade relativa da região analisada, ε_1 é a permissividade relativa do material 1, f_1 é a fração volumétrica do material 1 na região, ε_2 é a permissividade relativa do material 2, que no trabalho é o ar presente nos furos e f_2 é a fração volumétrica dos furos na região analisada (MEI; BAI; CUI, 2010). Relacionando-se a Figura 1 com a equação 1, é possível verificar que regiões com furos maiores, possuem uma maior fração de ar e uma menor fração do material, produzindo uma região com permissividade elétrica menor (mais próxima do ar). As regiões com furos menores possuem mais material e menos ar, tendo permissividade elétrica maior e mais próxima da permissividade elétrica do material utilizado.

Através da equação 2, pode-se observar que o índice de refração n é dependente da permeabilidade magnética relativa (μ_r) e da permissividade elétrica relativa (ε_r) do material. Em meios paramagnéticos, como é o caso de diversos polímeros e do ar, o valor de μ_r é ligeiramente maior que 1, podendo ser desconsiderado na equação, logo, o valor do índice de refração pode ser aproximado pela equação 3.

$$n = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \quad (2)$$

$$n \cong \sqrt{\varepsilon_r} \quad (3)$$

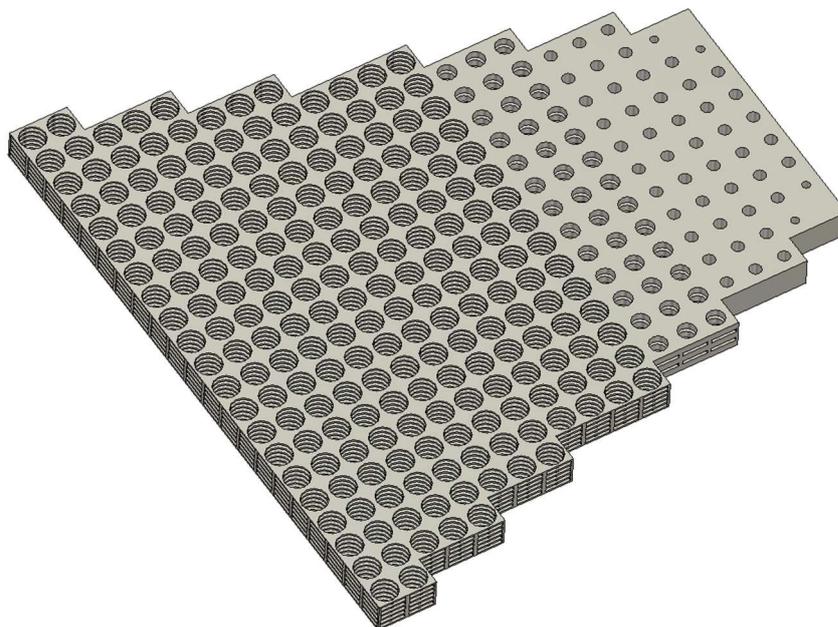
Utilizando a equação 3 como base, pode-se afirmar que o índice de refração é proporcional à permissividade elétrica relativa. Então, quando a onda eletromagnética atravessa o objeto da Figura 1 da esquerda para a direita acaba por encontrar índices de refração menores na parte superior do objeto e índices de refração maiores na parte inferior. Segundo a lei de Snell para refração, uma onda eletromagnética, ao passar de um meio com índice de refração menor para um meio com índice de refração maior, curva-se, aproximando-se de sua normal, reduzindo seu ângulo. Isso faz com que o caminho percorrido pela onda no interior do objeto curve-se em direção a sua parte inferior, favorecendo o deslocamento do caminho percorrido pela onda e produzindo o resultado discutido no trabalho, onde o objeto proposto curva a trajetória do feixe de micro-ondas em um ângulo de 45°.

Yi *et al.* (2016) projetaram um protótipo de um dispositivo de transição eletromagnética, normalmente utilizado entre conexões de guias de ondas (YI *et al.*, 2016). A função do dispositivo é promover a transição da frente de onda, permitindo a passagem da onda eletromagnética de um local mais largo para um local mais estreito. A estrutura foi construída utilizando furos ao longo de sua superfície e fabricado em uma impressora 3D, conforme esquema apresentado na Figura 2.

A estrutura começa do lado esquerdo com furos maiores e maior quantidade de espaços vazios entre as placas que compõem a estrutura. Segundo a relação definida pela equação 1, as regiões do lado esquerdo possuem constante dielétrica menor, devido a maior proporção de ar e menor proporção de material polimérico. Conforme a onda eletromagnética se desloca da esquerda para direita, encontra outras regiões, com furos menores e menos espaços vazios entre as placas. Isto produz regiões com constante dielétrica mais alta, já que a proporção de material polimérico é maior e a proporção de ar atmosférico menor (equação 1), o que também se traduz em índices de refração maiores (equação 3).

Do lado direito, a onda eletromagnética encontra índices de refração ainda maiores, sendo que a parte superior e inferior do lado direito exhibe índices de refração maiores que o interior. Tudo isso colabora para que a onda eletromagnética afunile dentro do objeto. O protótipo do objeto de transição eletromagnética foi caracterizado em frequências nas faixas dos GHz e THz, evidenciaram a eficiência da técnica de construção de objetos GRIN e semelhantes, através de processos de impressão 3D (YI *et al.*, 2016).

Figura 2 - Esquema de uma transição eletromagnética que utiliza furos para variação dielétrica.



Fonte: Próprio autor

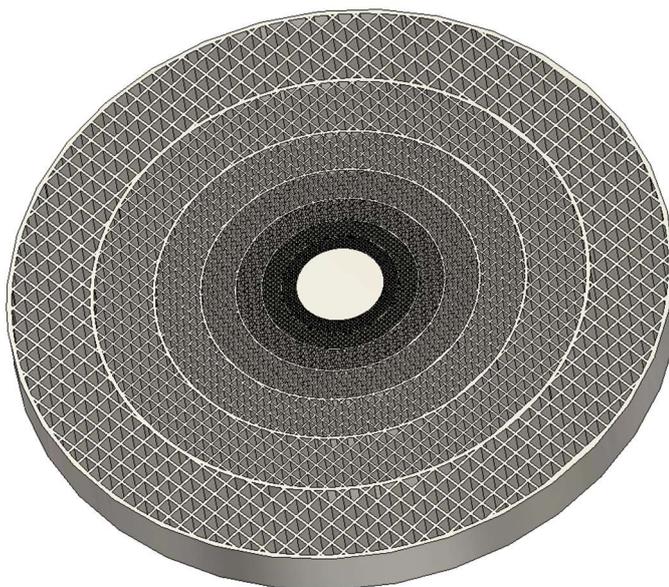
Zhang *et al.* (2017a) produziram um material composto contendo óxido de titânio (TiO_2) distribuído em uma matriz polimérica de polipropileno, analisando sua utilidade na construção de dispositivos com metamateriais. O trabalho incluiu a caracterização dielétrica do material produzido, demonstrando que é possível utilizar polímeros com carga cerâmica, para se obter materiais com permissividade elétrica mais altas, aumentando consideravelmente a variação do gradiente dielétrico, aproveitando-se das características estudadas anteriormente na produção de metamateriais dielétricos (ZHANG *et al.*, 2017a).

Outro trabalho desenvolvido por Zhang *et al.* (2017b) apresentou uma lente dielétrica impressa utilizando processos de manufatura aditiva como a impressão 3D. O estudo destaca a relação entre a permissividade do PLA, intercalado com padrões internos criados através de hachuramento (pequenas placas dispostas de forma perpendicular entre si, formando uma grade), com mini espaços internos preenchidos com ar e como esses padrões internos produziam constantes dielétricas personalizadas em cada região da lente (Figura 3).

A lente possui várias regiões distintas, apresentando um gradiente de índices de refração e os resultados mostraram que a lente foi eficaz na transformação de frentes de ondas esféricas em planas, demonstrando que é possível melhorar a

transmissão em antenas com esse tipo de lente e que a técnica de gradientes dielétricos pode ser reproduzida com sucesso em impressoras 3D do tipo FDM, utilizando padrões hachurados que podem ser facilmente reproduzidos por programas de impressão 3D ao invés de furos dispostos de forma periódica em substratos (ZHANG *et al.*, 2017b).

Figura 3 - Esquema da lente dielétrica para planificação de frente de ondas esféricas.



Fonte: Próprio autor

Goulas *et al.* (2020) também exploraram as técnicas de impressão 3D para produção de lentes dielétricas (GOULAS *et al.*, 2020). A diferença entre o trabalho de Zhang *et al.* (2017b) e de Goulas *et al.* (2020) está no material utilizado. O trabalho de Goulas *et al.* utilizou um filamento comercial com constante dielétrica alta na faixa do micro-ondas ($\epsilon_r = 10$), que utilizava carga de titanato de estrôncio (SrTiO_3) em sua composição. O trabalho analisou como certos parâmetros de impressão afetavam as características dielétricas de objetos produzidos. Verificou-se que a altura da camada (*layer thickness*), além de impactar no acabamento visual e nas propriedades mecânicas dos objetos impressos, também afetava as características dielétricas dos objetos impressos. Segundo Goulas *et al.*, após uma análise por microscopia de varredura eletrônica, foi identificado que camadas muito altas com 250 μm ou mais de espessura favoreciam o aparecimento de *gaps* de ar devido à falta de compactação das camadas durante a impressão. Também foi verificado que camadas muito compactas, com 150 μm ou menos de espessura, tinham tendência a ter escoamento

de material polimérico, favorecendo o aparecimento de lacunas de ar, reduzindo a permissividade elétrica relativa final dos objetos impressos. Os melhores valores para permissividade elétrica foram obtidos para espessuras de camadas em torno de 200 μm , que exibiram quantidades mínimas de lacunas de ar entre as camadas, produzindo objetos com $\epsilon_r = 9,64$ e $\tan\delta = 0,003$ (tangente de perdas), muito próximos dos valores obtidos pelo processo de injeção de materiais, que obtiveram valores de $\epsilon_r = 10$ e $\tan\delta = 0,004$.

Goulas *et al.* (2020) também analisaram como o parâmetro de impressão “densidade de preenchimento” (*fill density*) afetava os valores de permissividade elétrica relativa e tangente de perdas dos objetos impressos. Os resultados demonstraram que a densidade de preenchimento afeta diretamente a permissividade elétrica ao mesclar ar atmosférico através de padrões hachurados com o material de impressão, produzindo resultados semelhantes aos obtidos pelas técnicas de furos no material dielétrico, como a técnica utilizada para produção de gradientes de índices de refração (GRIN). Foi projetada uma aplicação real utilizando uma lente de Fresnel como base para aplicação. A lente projetada por Goulas *et al.* (2020) é semelhante à produzida por Zhang *et al.* (2016), com um espaço vazio no seu interior e apenas três camadas com variações dielétricas. Pelos resultados apresentados, pode-se afirmar que é possível colimar o feixe de micro-ondas na saída de uma guia de onda utilizando a lente projetada, melhorando a diretividade do sinal o que permitiu afirmar que a técnica foi eficaz na produção de objetos com padrões dielétricos complexos (GOULAS *et al.*, 2020).

Outros dispositivos de RF também podem ser produzidos através de processos de impressão 3D. A pesquisa conduzida por Martinez *et al.* (GARCÍA-MARTÍNEZ *et al.*, 2020) sobre o desenvolvimento de circuitos planares de micro-ondas, explora o processo de fabricação de substratos para circuitos de micro-ondas com técnicas de impressão 3D e sua posterior caracterização, apresentando a relação existente entre o material utilizado (filamento) e as opções de impressão. O trabalho de Martinez *et al.* incluiu a caracterização dielétrica de nove tipos de filamentos disponíveis no mercado e como o parâmetro de impressão “densidade de preenchimento” (*fill density*) afeta a constante dielétrica e a tangente de perdas. O processo de caracterização dielétrica utilizou um VNA (*Vector Network Analyzer*), que foi conectado a microlinhas com substratos dos materiais impressos. Os resultados coletados com o VNA foram comparados com a mesma versão simulada da microlinha

em simuladores eletromagnéticos, onde a variação nos valores de ϵ_r e $\tan\delta$ nos simuladores e comparação com suas curvas dos parâmetros simulados permitiram identificar quais valores de ϵ_r e $\tan\delta$ estavam presentes nos substratos impressos. Após a caracterização, alguns circuitos de micro-ondas foram construídos como prova de conceito. Os circuitos produzidos como prova de conceito validaram a técnica, que apresentou bons resultados na produção de substratos para circuitos de RF na faixa do micro-ondas.

2.2 Alteração das características dielétricas de materiais para utilização em processos de prototipagem rápida como a impressão 3D

Em impressoras do tipo FDM, o material utilizado para extrusão tem base polimérica. A maioria das impressoras 3D do tipo FDM utiliza polímeros na forma de filamentos. Diversas técnicas podem ser utilizadas para produzir filamentos com materiais compósitos, onde se adiciona algum tipo de carga (normalmente na forma de pó cerâmico ou metálico) ao material polimérico, visando alterar suas propriedades físicas.

Existem diversos tipos de filamentos no mercado com propriedades modificadas. Os filamentos com capacidade condutiva (contendo metais ou carbono em sua composição) permitem a impressão de objetos com trilhas condutivas, permitindo a inclusão de circuitos eletrônicos em geometrias não planares. Outros filamentos possuem adição de materiais cerâmicos, como na pesquisa conduzida por Skorski *et al.* (2016) que detalhou as alterações nas propriedades físicas de filamentos de ABS com carga de nanopartículas de TiO_2 . Foram conduzidos testes mecânicos e de degradação térmica, demonstrando que diversos tipos de nanopartículas podem ser incorporados em filamentos e como suas propriedades poderiam ser alteradas (SKORSKI *et al.*, 2016).

Em outro estudo, conduzido por Castles *et al.* (2016), foi detalhado como o titanato de bário (BaTiO_3) alterou as características dielétricas do ABS. Como o BaTiO_3 tem uma constante dielétrica alta, sua mistura na forma de pó conseguiu elevar consideravelmente a constante dielétrica do filamento de ABS. A produção e caracterização dos filamentos incluíram cargas de até 70% do peso total de BaTiO_3 dispersos na matriz de ABS. Após a produção dos filamentos com cargas de BaTiO_3 , foram realizados diversos testes de impressão com produção de objetos que mesclavam partes com filamentos de ABS com e sem carga de BaTiO_3 . Os testes de

impressão evidenciaram que o material produzido exibiu boa adesão entre as camadas impressas sendo um filamento útil para uso em impressões 3D. Caracterizações com microscopia de varredura eletrônica comprovaram a dispersão homogênea do BaTiO₃ dentro da matriz de ABS. A caracterização dielétrica de objetos impressos com diversas proporções de carga de BaTiO₃ no ABS revelou que é possível chegar a valores de $\epsilon_r = 8,72$ e $\tan\delta = 0,027$ para carga de 70% de BaTiO₃. 70% da carga em peso total de BaTiO₃ no ABS representou um volume de apenas 29% na produção do filamento. (CASTLES *et al.*, 2016).

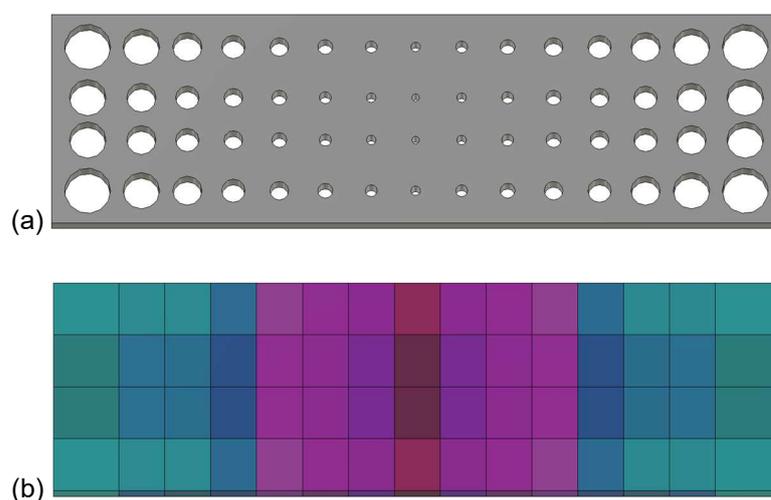
Vidakis *et al.* (2019) apresentaram um trabalho detalhando como nanopartículas de grafeno podem afetar as propriedades mecânicas e dielétricas de filamentos de PLA. A principal diferença do trabalho de Vidakis *et al.* em relação a outros trabalhos sobre produção de filamentos foi o conjunto de testes aplicado, visando confirmar como diversas propriedades de objetos impressos podem ser alteradas pela adição de carga de grafeno. O trabalho também afirmou que é possível aumentar de forma significativa a permissividade elétrica de filamentos PLA com a adição de grafeno (VIDAKIS *et al.*, 2019).

Um outro estudo conduzido por Kalaš *et al.* (2021) caracterizou 24 filamentos, incluindo diversos tipos de filamentos de ABS com carga de carbono. Entre eles, destaca-se o filamento de ABS ESD (*Electrostatic Discharge*). Suas características incluem uma constante dielétrica alta em relação ao filamento de ABS convencional e alta resistividade superficial. Os testes incluíram caracterizações das propriedades térmicas dos filamentos com informações detalhadas de diversos parâmetros importantes sobre temperaturas de transição vítrea (T_g) e temperaturas de oxidação térmica (T_{ox}). As caracterizações elétricas incluíram testes de condutividade, resistividade e permissividade elétrica. Esse estudo forneceu dados importantes que facilitaram a escolha de filamentos para outros estudos com dados relevantes sobre propriedades dielétricas (KALAŠ *et al.*, 2021).

3. PROPOSTA DE ESTUDO

A literatura corrente apresenta diversos estudos, que foram apresentados no capítulo 2, onde a variação da permissividade elétrica em objetos pode ser obtida através de diversas técnicas de construção. As técnicas incluem diversos processos convencionais de moldagem e técnicas de manufatura tradicional. Nestes processos a variação da permissividade elétrica relativa é feita através da intercalação da matéria prima com ϵ_r alto com o ar atmosférico, que possui ϵ_r baixo (Figura 4a). Com uso de impressoras 3D, o mesmo efeito poderia ser reproduzido ou com os mesmos furos no substrato ou com o interior poroso através do uso de padrões hachurados.

Figura 4 - Esquema demonstrando a técnica atual de variação dielétrica com intercalação de material com ar (a) e a novo método proposto (b).



Fonte: Próprio autor

A constante dielétrica final em uma região é uma relação entre o material naquela região e os espaços contendo ar (equação 1). O problema desta técnica é que as propriedades dielétricas do dispositivo final podem sofrer efeitos do ambiente, principalmente em objetos com furos ou hachuramentos expostos. Alterações nos níveis de umidade do ar ou acúmulo de resíduos podem levar a uma variação na permissividade elétrica final das regiões dos objetos, provocando desvios nos resultados esperados.

Para evitar este tipo de problema, a proposta deste estudo foi o desenvolvimento de um método de variação da permissividade elétrica relativa através de manufatura aditiva, utilizando-se de impressoras 3D e que não dependa

de intercalação com o ar. A técnica utiliza um processo de mistura de materiais que ocorre durante o processo de impressão, dispensando os *gaps* de ar na variação dielétrica. A Figura 4b apresenta uma visão esquematizada do método proposto que apresentaria resultado semelhante a variação dielétrica da Figura 4a. Cada cor representa um ϵ_r diferente, sendo as cores mais próximas do verde e azul são ϵ_r mais baixos e vermelhos e roxos, ϵ_r mais altos.

3.1 Desenvolvimento de uma técnica para variação da permissividade elétrica do material extrudado durante a impressão do objeto

A variação da permissividade elétrica pode ser alcançada utilizando-se de um método conhecido como mistura de filamentos. Esse processo já é utilizado em impressoras 3D como forma de obter tonalidades de cores diferentes das existentes nos filamentos de entrada (BACA; AHMAD, 2020). Nesta nova técnica, foram utilizados filamentos com constantes dielétricas distintas, que foram misturados durante a impressão e utilizados na produção de objetos com constantes dielétricas distintas. Com isso foi possível produzir objetos com qualquer tipo de variação dielétrica ao alcance dos materiais utilizados nos filamentos. Com a variação na pressão exercida pelos tracionadores, qualquer valor de constante dielétrica intermediária entre os dois filamentos de entrada poderia ser produzido. Objetos impressos podem ter variações na permissividade elétrica em qualquer local e em qualquer formato ou padrão, dentro da resolução espacial da impressora 3D.

3.2 Caracterização de objetos impressos com a técnica de mistura de filamentos

Para confirmar que a cabeça de impressão que faz mistura de filamentos pode ser utilizada na produção de objetos com variação da permissividade elétrica, diversos objetos foram impressos com valores únicos de constante dielétrica. A variação da permissividade elétrica foi alcançada variando-se a proporção dos filamentos, utilizando opções disponíveis no programa de fatiamento e no *firmware* da impressora 3D. Para analisar qual é o valor da constante dielétrica e da tangente de perdas dos objetos impressos, foram impressos substratos com proporções diferentes de cada filamento. Após a caracterização dielétrica de cada um dos substratos, é possível construir uma tabela, relacionando as proporções utilizadas, com os valores da constante dielétrica e das tangentes de perda. Essa tabela pode ser utilizada para

calcular valores intermediários da constante dielétrica, sem a necessidade de se analisar todas as possíveis variações de composição proporcionadas pela mistura de filamentos.

3.3 Desenvolvimento de uma aplicação que faça uso da técnica de variação dielétrica

Com o aperfeiçoamento da técnica proposta, diversos tipos de dispositivos que dependiam da técnica de intercalação de ar e material para variação da permissividade elétrica podem ser reproduzidos explorando a nova técnica. A grande vantagem de processos envolvendo impressões 3D é que após concluído todo o processo de simulação eletromagnética do dispositivo, ele pode ser rapidamente impresso. Dependendo das dimensões do objeto, ele pode ser impresso em uma única etapa de impressão.

A aplicação selecionada para a utilização da técnica de impressão desenvolvida neste trabalho foi a construção de uma lente dielétrica, inspirado no método utilizado por Mei e seus colaboradores (MEI; BAI; CUI, 2010), mas ao invés de utilizar furos para variação do dielétrico, utilizou-se a técnica de variação da constante dielétrica do material depositado durante o processo de impressão com o a técnica de mistura de filamentos.

3.4 Desenvolvimento de uma aplicação que inclua padrões internos como parâmetros de *design*.

Conforme apresentado anteriormente, diversos dispositivos projetados para operar com micro-ondas fazem uso de algum tipo de geometria que combinado com o material utilizado, produz algum tipo de efeito sobre a onda eletromagnética.

Os absorvedores são bons exemplos de dispositivos que combinam materiais com alta perda dielétrica e geometrias específicas para melhoria de suas capacidades absorvedoras de ondas eletromagnéticas. O material com alta perda dielétrica já é capaz de absorver a energia da onda eletromagnética ao atravessá-lo. A quantidade de energia que a onda perde para o material depende basicamente da tangente de perdas que o material possui e da distância percorrida pela onda dentro do material.

Ao fazer uso de geometrias específicas, os pesquisadores buscam aumentar consideravelmente o caminho percorrido pela onda eletromagnética (EM) no interior do objeto. Quanto maior o caminho percorrido pela onda EM dentro do material, maior

será a absorção de sua energia. Certas geometrias externas são capazes de produzir efeitos físicos de difrações, refrações e reflexões na onda EM. Estes efeitos promovem um espalhamento da onda EM dentro do material, aumentando o caminho percorrido, o que favorece sua absorção pelo material. A maioria dos absorvedores possui interior sólido exatamente para favorecer a absorção da onda eletromagnética em seu interior.

A capacidade de absorção de um absorvedor, também conhecida como absorvidade já foi alvo de diversas pesquisas que recorrem à combinação de dois ou mais materiais e uso de geometrias ainda mais complexas. Como a geometria externa é capaz de amplificar os efeitos de absorção dos materiais em absorvedores, é de se esperar que o uso de geometrias e padrões internos também consigam produzir efeitos semelhantes. Isto melhoraria consideravelmente a absorvidade e reduziria a quantidade de material utilizado no absorvedor.

A proposta é incluir as geometrias internas na forma de padrões internos como parâmetros de *design* permitindo melhorar as propriedades de absorvidade dos absorvedores. O objetivo é demonstrar que geometrias internas na forma de padrões internos podem possuir tanta relevância quanto as geometrias externas no desenvolvimento de absorvedores.

3.5 Desenvolvimento de uma aplicação que utilize transferência capacitiva utilizando filamentos condutivos

Diversos trabalhos exploram técnicas de impressão 3D na produção de circuitos elétricos e eletrônicos utilizando filamentos condutivos. Muitos destes filamentos possuem carga de carbono com propriedades condutivas (FLOWERS *et al.*, 2017). Diversos tipos de circuitos com geometrias não convencionais já foram desenvolvidos, contendo trilhas e pistas internas, onde diversos tipos de componentes eletrônicos podem ser agregados (LAZARUS; TSANG, 2020). Dentre estes objetos, podem-se citar pesquisas e desenvolvimento de tecnologias vestíveis, contendo sensores impressos e circuitos sendo construídos ao longo de qualquer tipo de objeto (NOLDEN; ZÖLL; SCHWARZ-PFEIFFER, 2021).

Com a proposta de utilização de filamentos condutivos na construção de dispositivos através de técnicas de impressão 3D foi conduzida uma revisão na literatura. Essa revisão teve o objetivo de identificar oportunidades ainda não exploradas no uso deste tipo de filamento. Durante este processo verificou-se a baixa

quantidade de trabalhos publicados na área de transferência de energia. Poucos trabalhos utilizando transferência indutiva de energia e com uso de técnicas de impressão 3D foram publicados. Analisando-se as pesquisas sobre circuitos de transferência de energia, foi constatada a ausência de trabalhos que apresentassem transferências capacitivas de energia empregando técnicas de impressão 3D.

Um dispositivo de transferência capacitiva de energia utiliza campos elétricos gerados por placas condutivas com algum tipo de material dielétrico entre elas para transferir energia. As placas condutivas poderiam ser impressas com o uso de filamentos condutivos e o material dielétrico poderia ser construído a partir de filamentos poliméricos convencionais. Utilizando-se de técnicas de impressão 3D, dispositivos deste tipo poderiam ser desenvolvidos e suas propriedades poderiam ser analisadas.

A proposta foi a construção de um dispositivo de transferência capacitiva de energia utilizando-se exclusivamente de técnicas e materiais disponíveis em impressão 3D. Para o material dielétrico foram utilizados filamentos a base de PLA e PLA condutivo com carga de carbono foi utilizado para produção das partes condutivas. Após o modelamento eletromagnético do circuito, um protótipo foi apresentado e impresso e suas capacidades de transferência de energia foram analisadas.

4. DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA PARA VARIAÇÃO DIELÉTRICA DURANTE O PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

Conforme apresentado anteriormente, a literatura descreve diversos estudos em que a produção de dispositivos com variações dielétricas é obtida utilizando-se como base a intercalação de ar/material. Através desta técnica é possível produzir regiões com uma constante dielétrica específica. Não foram encontrados na literatura outros formatos de produção de gradientes dielétricos, embora seja plausível afirmar que gradientes dielétricos possam ser criados utilizando-se de diversas peças com materiais de várias constantes dielétricas, colados um no outro. Também não foram encontrados trabalhos que produzissem essa variação dielétrica utilizando-se objetos sólidos.

A técnica proposta consiste em variar as proporções de material durante o processo de impressão, permitindo que o material na saída do bico da impressora 3D sofra variação da constante dielétrica. Com isso, seria possível imprimir objetos sólidos com constantes dielétricas distintas em qualquer parte do objeto e impressão de gradientes dielétricos em qualquer padrão e sem depender da intercalação do material com o ar. A técnica utilizou uma mistura de dois filamentos produzidas no momento da impressão. Qualquer valor de constante dielétrica entre o maior e o menor valor disponível nos filamentos de entrada poderia ser obtida com o uso da técnica.

Para a execução deste trabalho, foi adotada uma metodologia que envolveu:

- a) Escolha dos materiais dielétricos;
- b) Desenvolvimento de uma impressora 3D que possa trabalhar com processos de mistura de filamentos;
- c) Impressão de substratos e caracterização dos valores das constantes dielétricas e das tangentes de perdas para cada uma das proporções de misturas pré-definidas.

4.1 Escolha do material

Objetos obtidos por impressoras 3D têm basicamente suas características determinadas por dois fatores: o material utilizado e os parâmetros de impressão aplicados. O material utilizado determina a maioria das propriedades do objeto impresso. Os parâmetros de impressão, como altura da camada e densidade de

preenchimento, também afetam as características físicas do objeto, permitindo alterar as propriedades mecânicas e dielétricas finais do objeto, fornecendo controles adicionais sobre as propriedades do material utilizado.

O PLA é um material muito utilizado em pesquisas envolvendo técnicas de manufatura aditivas, como impressão 3D. Diversos estudos foram conduzidos visando a caracterização de suas propriedades mecânicas e dielétricas (BACA; AHMAD, 2020; JAYAMANI; NAIR; SOON, 2020; VIDAKIS *et al.*, 2019). O PLA convencional é um material muito útil no desenvolvimento de dispositivos e protótipos que necessitam de baixa tangente de perdas, mas tem durabilidade limitada de seus protótipos por ser biodegradável. Já o ABS é um tipo de material polimérico muito utilizado em processos de impressão 3D, durável e com boas propriedades térmicas e dielétricas (KALAŠ *et al.*, 2021). Diversos estudos já demonstraram que filamentos de ABS com adição de materiais cerâmicos possuem algumas propriedades úteis ao campo de RF e micro-ondas, como alta constante dielétrica e sem perda significativa de suas propriedades mecânicas (CASTLES *et al.*, 2016; KHATRI *et al.*, 2018).

Filamentos de ABS com adição de grafite em pó, também conhecido como ABS ESD, já foram caracterizados em estudos anteriores (KALAŠ *et al.*, 2021; PENTEK *et al.*, 2020), onde foi explorada a influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas e dielétricas dos objetos impressos. Por possuir carga de carbono na sua constituição, esse material possui permissividade elétrica alta e uma tangente de perdas consideravelmente elevada em frequências entre 10 e 18 GHz (DROZDOV; DECLAVILLE CHRISTIANSEN, 2020). Um outro estudo estimou a quantidade de carbono na composição de 5 tipos de ABS ESD disponíveis no mercado internacional, com uma quantidade de carbono em torno de 18,2% do seu peso total (UJFALUSI *et al.*, 2020).

Testes em laboratório conduzidos neste trabalho demonstraram que o filamento ABS ESD pode ser utilizado em processos de mistura de filamentos, tendo $\epsilon_r = 6,5$ e $\tan \delta = 0,361$ em frequências próximas a 2.24 GHz, sendo que o valor de $\epsilon_r = 6,5$ compatível com os valores encontrados por Drozdov *et al.* (DROZDOV; DECLAVILLE CHRISTIANSEN, 2020), sendo um pouco menor que 7, que pode ser explicado pelo fato de objetos impressos em impressoras 3D terem valores de ϵ_r um pouco menores que suas versões sólidas produzidas por técnicas de injeção (GOULAS *et al.*, 2020).

Os estudos conduzidos neste trabalho necessitam de dois filamentos com grande diferença em suas constantes dielétricas. O filamento de ABS convencional foi testado em laboratório e apresentou $\epsilon_r = 2,55$ e $\tan \delta = 0,03$. Com uma diferença em seus ϵ_r de 3,95, os dois filamentos podem ser utilizados para produzir um amplo espectro de gradientes dielétricos. Apesar do trabalho desenvolvido utilizar filamentos com polímeros ABS, qualquer tipo de filamento pode ser utilizado nesta técnica com quaisquer valores de ϵ_r . O uso de um filamento com ϵ_r mais alto permitirá inclusive uma maior variação no gradiente dielétrico.

Para facilitar a terminologia adotada neste trabalho, a sigla ABS é utilizada para designar o ABS convencional e sigla ABSg para designar o ABS ESD (ABS com carga de carbono).

Apesar de ser possível utilizar qualquer tipo de filamento, inclusive de materiais com base polimérica distintas, existem duas ressalvas. Os filamentos devem possuir temperaturas de fusão semelhantes. Como a cabeça de impressão com mistura de filamentos trabalha com uma única temperatura de fusão, deve-se encontrar uma temperatura compatível aos dois filamentos. Caso isso não ocorra, o filamento com menor temperatura de fusão poderia entrar em degradação térmica ou ficar excessivamente fluido, inviabilizando o processo de mistura.

Os dois filamentos também devem ser miscíveis entre si. Quando dois polímeros não são miscíveis, eles apresentam baixa adesão entre suas partes. Isto comprometeria as propriedades mecânicas dos objetos impressos tornando-os inadequados para uso em qualquer estrutura que exija solicitação mecânica.

4.2 Desenvolvimento de uma impressora 3D FDM que trabalhe com impressões por mistura de filamentos

As impressoras 3D FDM disponíveis no mercado normalmente estão preparadas para trabalhar com apenas um filamento. A maioria delas pode ser adaptada para trabalhar com processos de mistura de filamentos, mas diversos problemas de *design* ou de reconfiguração do *firmware* podem dificultar o processo de adaptação. Para evitar problemas com adaptação de impressoras 3D adquiridas no mercado, optou-se por desenvolver uma impressora 3D FDM tendo como parâmetro principal o uso do processo de mistura de filamentos. Foi selecionado um conjunto de projetos de impressoras 3D disponíveis de forma gratuita através de projetos abertos que possuíam adaptações para cabeças de impressão com mistura

de filamentos. O modelo escolhido para construção foi a *Prusa I3 Rework*, que possui todo o projeto aberto e amplamente documentado na internet (PRUSA, 2012).

Alguns trabalhos utilizam o termo FFF (*Fused Filament Fabrication* ou Fabricação por Filamento Fundido) para nomear o tipo de impressão por processo de fusão de filamento. O termo FFF é análogo ao FDM.

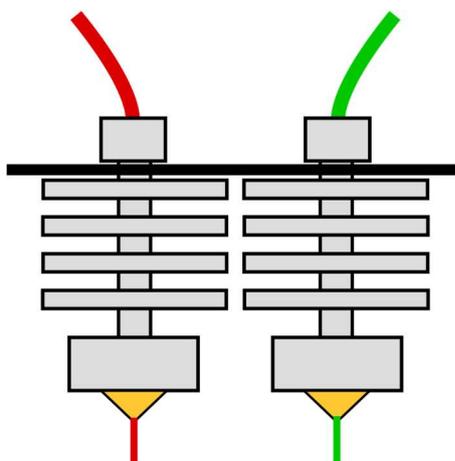
4.2.1 Cabeça de impressão

Cabeças de impressão são uma parte importante em impressoras 3D do tipo FDM, sendo que diversas características, como resolução do objeto impresso e formato do material utilizado (filamento ou *pellets*), são determinadas pela cabeça de impressão. A maioria das impressoras FDM utiliza cabeças de impressão que fazem uso de um único bico de impressão com apenas um filamento na entrada. Estes filamentos são empurrados para seu interior através de tracionadores e aquecidos próximos ao bico de saída. Em impressoras com apenas um bico de impressão, é possível alternar o filamento utilizado durante a impressão através de pausas onde o filamento deve ser manualmente substituído e a impressão restabelecida.

Existem impressoras com mais de um bico de impressão em suas cabeças. Estas impressoras são chamadas de impressoras multimateriais por sua capacidade de trabalhar com dois ou mais filamentos de materiais diferentes. A principal vantagem deste tipo de cabeça de impressão é que dois materiais de temperaturas diferentes de fusão podem ser utilizados ao mesmo tempo. Há na literatura trabalhos explorando técnicas de impressão onde o objeto possui regiões impressas com materiais diferentes, apresentando características distintas que dependiam do material utilizado na região (CASTLES *et al.*, 2016; GRIFFITHS; LEIGH, 2019; ISAKOV *et al.*, 2016).

Uma representação esquemática de uma cabeça de impressão com dois bicos é apresentada na Figura 5. Os filamentos com o material de entrada são representados na parte superior nas cores vermelho e verde. As aletas no centro servem para resfriamento da parte superior da cabeça de impressão e normalmente possuem uma ventoinha acoplada. Os blocos na parte inferior promovem o aquecimento dos bicos, representados na cor amarela. Na parte inferior estão os fios aquecidos que saem pelos bicos de impressão.

Figura 5 - Representação esquematizada de uma cabeça de impressão com dois bicos.



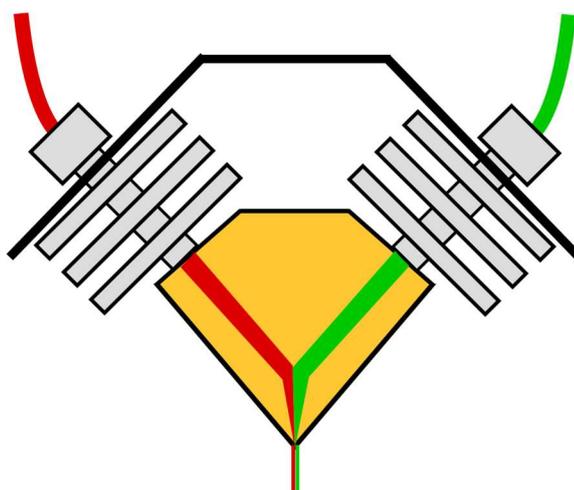
Fonte: Próprio autor

Em um processo com dois bicos de impressão, os materiais podem ser depositados lado a lado ou determinadas regiões podem ser impressas com materiais de qualquer um dos bicos, mas a impressão é feita com um bico por vez, não existindo acionamento simultâneo dos dois bicos de impressão.

Um outro processo de impressão FDM envolve o uso de bicos que fazem um processo conhecido como mistura de filamentos (PASCALE; SIMION, 2018). Neste processo, dois ou mais filamentos são introduzidos no mesmo bico de impressão e após aquecidos fluem para a saída do bico misturados. Um exemplo esquematizado do bico de impressão conhecido como “*Diamond Hotend*” é apresentado na Figura 6. O fio de saída deste tipo de bico de mistura de filamentos normalmente é no diâmetro de 400 μm e pode ser uma mistura dos materiais dos filamentos de entrada em proporções que dependem essencialmente da força de tração exercida pelos tracionadores dos filamentos. Uma força de tração idêntica nos dois tracionadores produz um fio de saída com 50% de cada material em sua composição. Uma representação esquemática de uma cabeça de impressão com bico de mistura de filamentos é apresentada na Figura 6. A figura também mostra como é feita internamente a mistura do filamento. As cores vermelho e verde representam os filamentos de entrada na parte superior. As aletas são utilizadas para refrigeração da parte superior da cabeça e possuem uma ventoinha acoplada. O bloco em amarelo possui uma resistência elétrica que promove o aquecimento da cabeça e um sensor de temperatura.

A cabeça de impressão por mistura de filamentos utiliza um único bico de saída do material e, conseqüentemente, trabalha com uma única temperatura de fusão para o material de entrada. Os polímeros utilizados nos filamentos devem ter temperaturas de fusão semelhantes de forma a evitar problemas de entupimentos, degradação térmica ou excesso de fluidez de um dos polímeros, o que inviabilizaria o processo de impressão.

Figura 6 - Representação esquematizada de uma cabeça de impressão com bico de mistura de filamentos e de sua câmara interna.



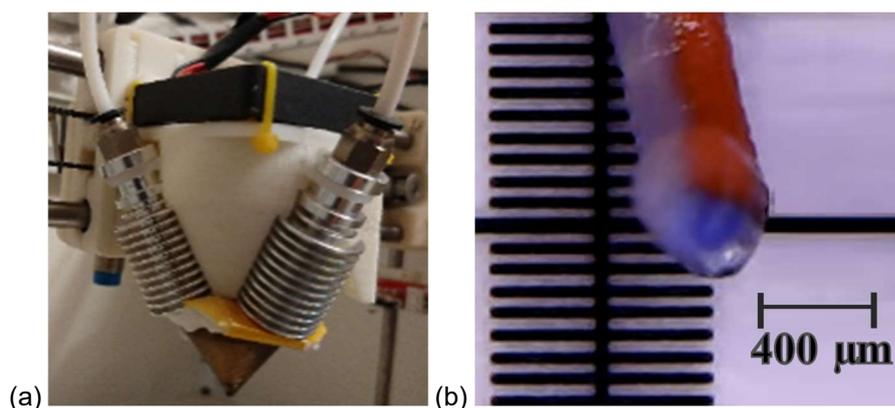
Fonte: Próprio autor

A Figura 7a apresenta o bico de impressão conhecido como *Diamond HotEnd*, que é um bico de impressão capaz de receber até três filamentos e fazer a sua mistura, produzindo um único fio na saída com proporções dos materiais de entrada que vão depender da pressão exercida pelos tracionadores dos filamentos. A Figura 7b apresenta um fio da saída do bico ampliado com a mistura de três filamentos. Este processo de mistura de filamentos é normalmente utilizado na produção de objetos com variação de cores (BACA; AHMAD, 2020).

Apesar de ser nomeada como uma cabeça de impressão com mistura de filamentos, é importante destacar que não ocorre um processo real de mistura. O que ocorre é que os materiais dos filamentos saem fundidos um ao lado do outro. Como o fio de saída tem 400 μm , a percepção visual é que estão misturados. O processo de impressão, por possuir movimento em praticamente todas as direções nos eixos X e Y, colabora na obtenção de um aspecto visual homogêneo, não deixando um determinado material em evidência na impressão. Em alterações do diâmetro da saída

da cabeça *Diamond* para 600 μm , já ocorre percepção visual que existem dois ou mais fios unidos, que se parecem visualmente como faixas ao longo fio de 600 μm de diâmetro.

Figura 7 - Bico de impressão *Diamond HotEnd* (a) e exemplo ampliado de fio produzido pela saída do bico (b).



Fonte: Próprio autor

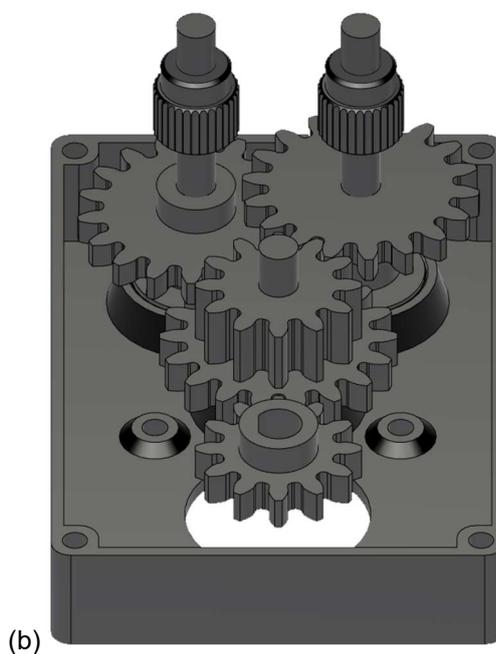
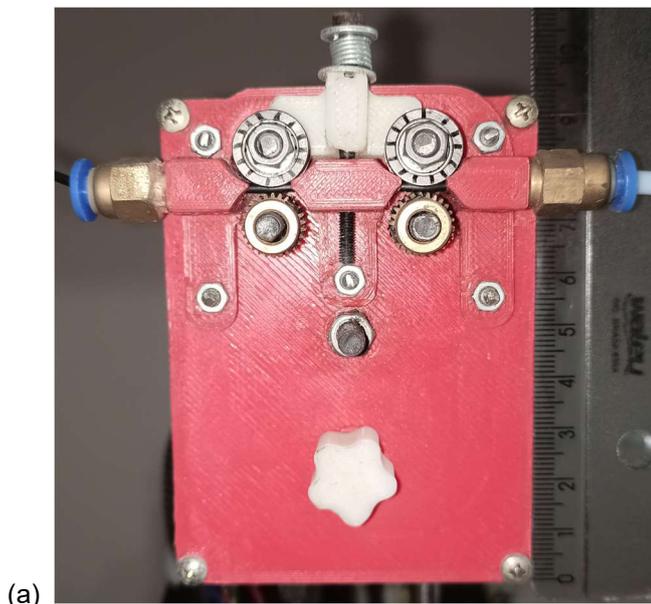
Para este trabalho, foi escolhida a cabeça de impressão *Diamond HotEnd* (Figura 7a). Apesar dessa cabeça de impressão possuir três entradas para filamento, apenas duas entradas foram utilizadas. A terceira entrada foi mantida preenchida com um filamento de ABS convencional, sem tração. Isto evita que o material de impressão saia por essa entrada durante o processo de impressão.

A cabeça de impressão *Diamond* trabalha com uma temperatura ligeiramente maior que as cabeças normais de impressão 3D. Isso se deve ao fato de existirem dois ou mais filamentos sendo tracionados no seu interior, aumentando significativamente a quantidade de material a ser fundido em seu interior. Um acréscimo de 15 a 20°C durante a impressão é necessário para facilitar o escoamento do material do filamento pela saída do bico. Em processos de impressão com o uso de apenas um filamento, não é necessário o acréscimo de temperatura no bico de impressão para a cabeça *Diamond*.

Logo nos primeiros testes de impressão, foi verificado que o material ABSg é bem mais viscoso que o ABS convencional. Em impressões utilizando 100% do filamento ABSg na saída, a impressão ocorreu normalmente, sem nenhum tipo de entupimento. Ao executar os testes de impressão com mistura de filamentos com ajuste para 50% de filamento ABSg e 50% de ABS convencional, diversos problemas

de entupimentos ocorreram. Isso foi reduzido, aumentando a abertura da saída do bico para 600 μm de diâmetro com o auxílio de uma broca.

Figura 8 - (a) Caixa de tração com redução de 3:1 nos motores e dois tracionadores de filamentos.
(b) Esquema interno da caixa de redução com os eixos tracionadores.



Fonte: Próprio autor

Mesmo com uma maior abertura no bico de saída, houve uma redução drástica na ocorrência de entupimentos, mas problemas de entupimentos ocasionais ainda ocorriam. Foi verificado que os entupimentos cessavam quando se utilizava

tração manual forçada. Ao se analisar os filamentos, verificava-se que os tracionadores tinham dificuldade em tracionar o filamento ABSg quando ocorria a mistura de filamentos.

Para resolver este problema, foi desenvolvido um novo modelo de tracionador de filamentos com dois eixos tracionadores, apresentados na Figura 8a. Os dois eixos tracionadores são responsáveis por aumentar a área de contato do tracionador com filamento, distribuindo melhor a força de tração (peças na cor dourada). A Figura 8b mostra um esquema interno das engrenagens do tracionador e dos eixos tracionadores, funcionando como uma caixa de redução. A relação das engrenagens é de 3:1. Esta relação aumenta o torque na tração do filamento. Com o aumento da área de tração e do torque na tração do filamento, os problemas com entupimentos relativos a baixa tração foram resolvidos. A caixa e as engrenagens internas foram produzidas com o auxílio de uma impressora 3D utilizando-se ABS convencional.

4.2.2 Programa de fatiamento

O código que faz a conversão do objeto 3D em comandos para impressora é chamado de programa de fatiamento. Sua principal função é receber como entrada o modelo 3D e fatiá-lo, normalmente no eixo Z, já que as impressoras 3D trabalham com impressão por camadas. Cada camada é convertida em comandos Gcode que são responsáveis pelo controle de movimento da cabeça de impressão e tração dos filamentos. Um atributo importante do programa de fatiamento é sua capacidade de preencher as partes vazias dos objetos com estruturas de suporte, permitindo que a impressão 3D aconteça sem que partes do objeto caiam ou se soltem durante a impressão (BUDMEN; ROTOLO, 2013).

O programa de fatiamento possui diversos parâmetros de impressão, mas 3 deles são determinantes nas propriedades do objeto impresso.

O primeiro, altura da camada (*Layer Height or Layer thickness*), é o principal fator que determina a adesão entre as diversas camadas impressas, afetando diretamente as propriedades mecânicas. O programa de fatiamento calcula a quantidade de material ejetado pelo bico extrusor utilizando os movimentos nas direções XY, o diâmetro do filamento e o diâmetro do bico de saída da extrusora. Quanto maior for a altura entre as camadas, mais espaço o material terá para ser depositado, afetando a compactação da camada e sua adesão a camada anterior. O

ideal é que a trilha depositada sofra compactação, o que melhora sua adesão à camada anterior por aumentar a superfície de contato. Ao se compactar a camada, ocorre a redução dos espaços vazios internos, reduzindo as lacunas de ar. A compactação da camada também melhora o aspecto visual do objeto impresso (WICKRAMASINGHE; DO; TRAN, 2020). Camadas excessivamente compactadas podem apresentar escoamento do material no seu entorno, o que também provocaria *gaps* de ar entre as camadas (CASTLES *et al.*, 2016).

Os outros dois parâmetros são o “padrão de preenchimento” (*Fill pattern*) e a “densidade de preenchimento” (*Fill density*) e determinam como são desenhadas as linhas internas do objeto (padrão) e a distância entre elas. Uma densidade de preenchimento menor implica em mais espaços vazios em seu interior. Os pequenos espaços internos produzidos pela densidade de preenchimento mais baixa (espaços com ar), intercalados com material de constante dielétrica mais alta, acabam produzindo regiões com constante dielétrica intermediária, entre os valores do ar e do material utilizado (GOULAS *et al.*, 2020). O padrão de preenchimento deixa de ser um parâmetro importante quando a densidade de preenchimento é de 100%. Neste caso, apenas o movimento da cabeça varia no preenchimento interno, mas ele é totalmente ocupado pelo material, não deixando nenhum espaço interno disponível.

Um programa de fatiamento viável para este trabalho deve permitir que determinadas partes dos objetos possam ser ajustadas para impressão com diferentes tipos de ferramentas de extrusão. O programa PrusaSlicer versão 2.3.3 (disponível de forma gratuita no site do projeto onde está hospedado) possui funções para trabalhar com diversas ferramentas de extrusão. O objeto a ser impresso deve ser dividido em várias partes, que podem ser carregadas no programa e uma ferramenta de extrusão pode ser atribuída a cada parte carregada.

Os comandos Gcode para configurar as extrusoras virtuais devem ser enviados para a impressora antes dos outros comandos de impressão do objeto. O programa PrusaSlicer possui a opção “*Start Gcode*” onde é possível inserir estes comandos.

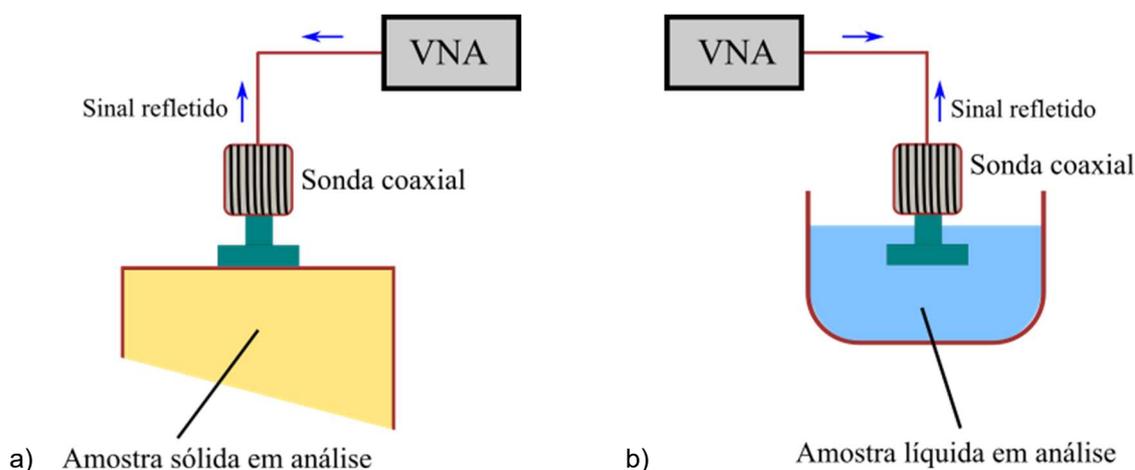
4.3 Impressão e caracterização de substratos

Para que o processo de impressão 3D por mistura de filamentos possa ser utilizado na produção de peças com variação dielétrica, é necessário que testes

controlados sejam realizados, visando identificar quais proporções de misturas podem produzir determinados valores de constantes dielétricas e sua tangente de perdas. Estes testes têm como objetivo identificar e garantir que exista reprodutibilidade das propriedades exibidas pela técnica e devem incluir a impressão de vários conjuntos de peças com proporções idênticas, para determinar se a técnica é estável, garantindo que uma determinada proporção reproduz o mesmo valor da constante dielétrica.

Alguns trabalhos, como o de Jilani *et al.* (JILANI *et al.*, 2012), apresentam uma revisão das diversas técnicas que podem ser utilizadas para caracterização dielétrica de materiais. Entre os processos descritos está o método de sonda coaxial (*Coaxial Probe Method*), onde a ponta de um cabo coaxial é inserida em um objeto e com a utilização de um VNA é possível medir o coeficiente de reflexão complexo do objeto Figura 9. Esta técnica é particularmente útil em objetos no formato de blocos, pastosos ou em estado líquido. Uma desvantagem desta técnica é que apenas o parâmetro S_{11} pode ser obtido (JILANI *et al.*, 2012), tornando a técnica menos precisa, enquanto outras técnicas permitem obter tanto o parâmetro S_{11} e S_{21} dos materiais analisados.

Figura 9 - Esquema de sonda coaxial para caracterização dielétrica de amostras sólidas (a) ou líquidas (b).



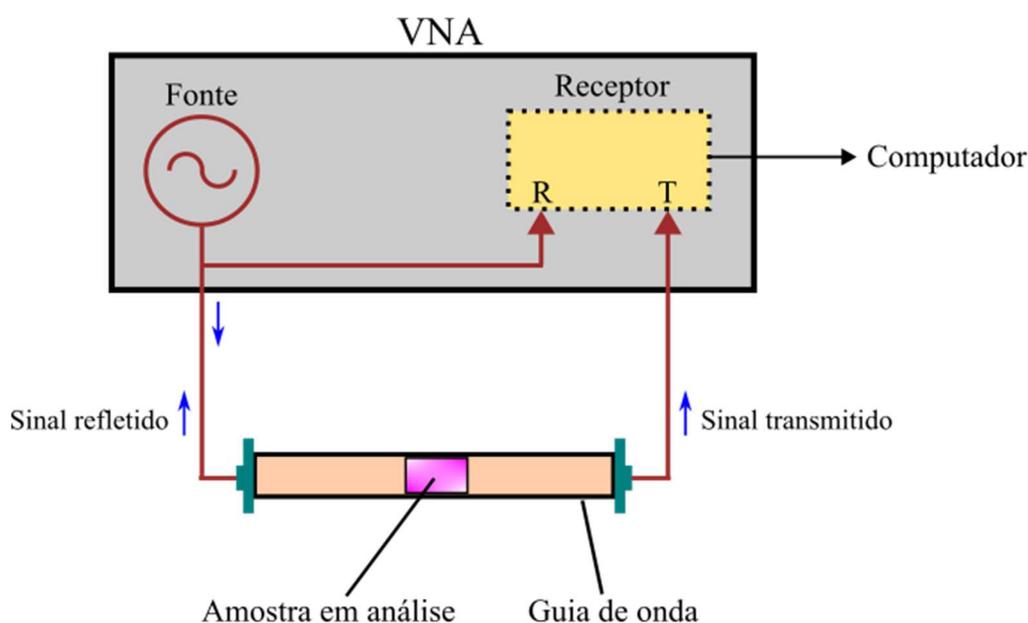
Fonte: Próprio autor

Com a técnica de caracterização dielétrica por linha de transmissão em guia de onda (Figura 10) é possível medir as características dielétricas de um objeto inserido dentro do tubo de uma guia de onda (JILANI *et al.*, 2012). O VNA faz a leitura de um conjunto de frequências obtendo o que é chamado de parâmetros de espalhamento. O parâmetro S_{11} é utilizado para medir a reflexão (R) existente no

sistema conectado à porta 1, já o parâmetro S_{21} é utilizado para medir a transmissão (T), ou seja, o quanto do sinal emitido pela porta 1, chegou até a porta 2 após atravessar o sistema conectado às portas 1 e 2.

O uso de duas curvas (parâmetros S_{11} e S_{21}) aumenta a precisão dos resultados na obtenção da permissividade elétrica. A restrição dessa técnica está no formato do objeto, uma vez que ele deve cobrir completamente a parte interior da seção da guia de onda onde ele foi inserido, ou ocorrerão imprecisões nos cálculos da permissividade elétrica.

Figura 10 - Esquema de um equipamento para caracterização dielétrica utilizando guia de onda.



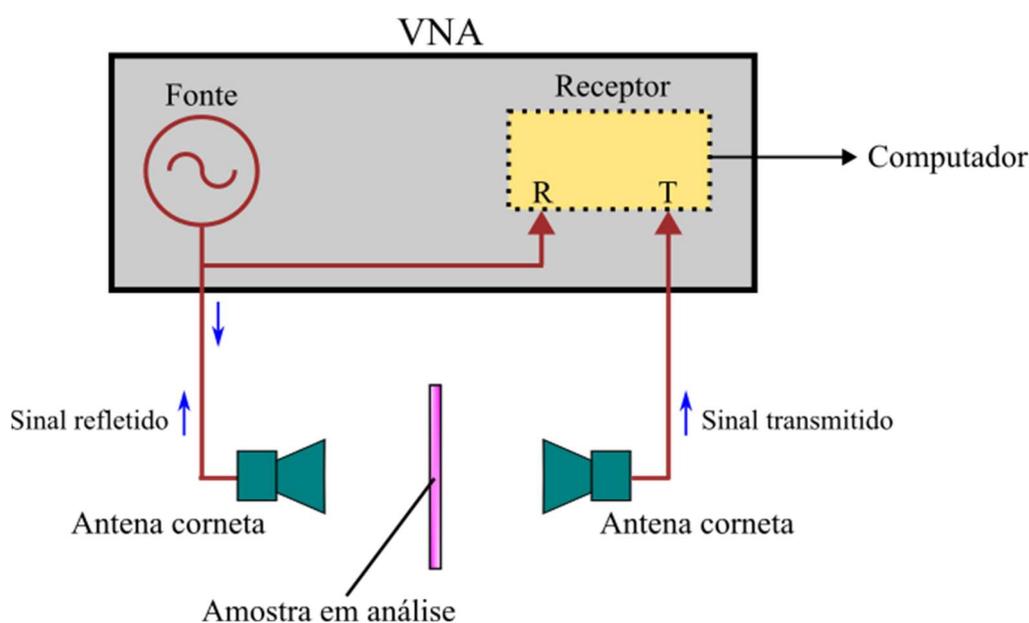
Fonte: Próprio autor

Outra técnica descrita por Jilani *et al.* consiste em medir as características dielétricas de um objeto plano fino, utilizando-se de duas antenas do tipo corneta (JILANI *et al.*, 2012). O método é conhecido como método do espaço livre (*Free Space Method*). Duas antenas cornetas são conectadas em um VNA que seja capaz de medir a reflexão e a transmissão do sinal (parâmetros S_{11} e S_{21}). As antenas são colocadas apontando-se uma para a outra e o material analisado é posicionado entre as duas antenas (Figura 11). A técnica produz bons resultados, mas possui limitações na geometria do objeto a ser analisado. Se o objeto possuir superfícies inclinadas, pode produzir fenômenos adicionais de difração e refração que podem interferir nos

resultados. O ideal é que o objeto a ser analisado tenha superfícies planas e tenha dimensões superiores às antenas utilizadas.

Catarinucci *et al.* apresentaram uma técnica para caracterização dielétrica de materiais produzidos em impressoras 3D (CATARINUCCI *et al.*, 2017), inspirados em um trabalho anterior, sobre caracterização dielétrica de placas de circuitos impressos (LÄTTI *et al.*, 2007). Catarinucci *et al.* exploraram como diferentes densidades de preenchimento afetariam as propriedades dielétricas de objetos impressos com filamentos de PLA. A técnica utilizada para obtenção das propriedades dielétricas consistiu em imprimir pequenas placas do material. Estas placas foram utilizadas como substratos de ressonadores em T.

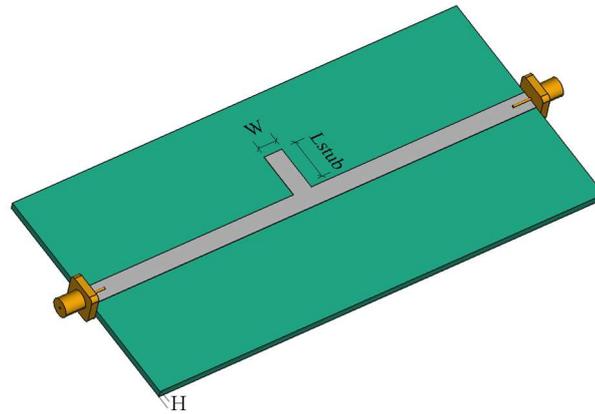
Figura 11 - Esquema de um equipamento para caracterização dielétrica utilizando antenas do tipo corneta.



Fonte: Próprio autor

Os ressonadores são feitos com fitas de cobre recortadas e coladas no substrato impresso. O plano terra é feito com uma fita de cobre cobrindo toda a superfície inferior. Conectores SMA são soldados nas pontas das fitas que formam uma microlinha (Figura 12). Um equipamento do tipo VNA é conectado através de cabos aos conectores SMA da placa e os parâmetros S_{11} e S_{21} podem ser obtidos, permitindo-se calcular a constante dielétrica e a tangente de perdas.

Figura 12 - Esquema de um ressonador planar para caracterização dielétrica.



Fonte: Próprio autor

O ressonador em T é eficiente em medir as propriedades dielétricas de materiais na faixa do micro-ondas (CATARINUCCI *et al.*, 2017). O ressonador apresentado segue o modelo de um ressonador de um quarto de onda. Ao se obter o parâmetro S_{21} , alguns vales (ou picos negativos) são produzidos pelo ressonador, que ao ressoar consome a energia da onda em sua frequência de ressonância, que não chega à porta 2, produzindo os vales. A frequência central do vale ou do pico negativo é a frequência ressonante f_n , (n é um número ímpar representando qual frequência de ressonância está sendo utilizada). Conhecendo-se o comprimento do ressonador L_{stub} , a constante dielétrica efetiva (ϵ_{reff}) do circuito pode ser calculada com a equação 4.

$$\epsilon_{reff} = \left(\frac{nc}{4f_n(L_{stub} + \Delta L)} \right)^2 \quad (4)$$

onde c é a velocidade da luz, n é um número ímpar representando a frequência de ressonância identificada no parâmetro S_{21} , f_n é a frequência de ressonância utilizada (também identificada pelo parâmetro S_{21}). ΔL é um comprimento adicional que leva em conta efeitos produzidos pela extremidade do ressonador e é definido como $\Delta L = 0,441H$ (sendo H a espessura do substrato). Com o ϵ_{reff} calculado, o valor da constante dielétrica do substrato (ϵ_r) pode ser calculada através da equação 5, descrita por Catarinucci *et al.* (CATARINUCCI *et al.*, 2017)

$$\varepsilon_r = \frac{2\varepsilon_{reff} + \left(1 + 12\left(\frac{H}{W}\right)\right)^{-\frac{1}{2}} + 0.04B - 1 - 0.434\left(\frac{T}{\sqrt{WH}}\right)}{1 + \left(1 + 12\left(\frac{H}{W}\right)\right)^{-\frac{1}{2}} + 0.04B - 0.434\left(\frac{T}{\sqrt{WH}}\right)} \quad (5)$$

onde H é a altura do substrato, W é a largura do toco e da microlinha, T é a espessura da fita de cobre condutiva. B é uma constante que será definida por $B=2\left(1-\frac{W}{H}\right)$ para $\frac{W}{H}<1$ ou $B=0$ para $\frac{W}{H}>1$.

Para calcular a tangente de perdas ($\tan \delta$), utiliza-se a equação 6.

$$\tan \delta = \frac{\alpha_d \lambda_g \sqrt{\varepsilon_{reff}} (\varepsilon_r - 1)}{\varepsilon_r (\varepsilon_{reff} - 1)} \quad (6)$$

onde λ_g é o comprimento de onda na microlinha para a frequência de ressonância f_n e pode ser calculado pela equação 7.

$$\lambda_g = \frac{c}{f_n \sqrt{\varepsilon_{reff}}} \quad (7)$$

α_d é a atenuação causada por perdas dielétricas no substrato que pode ser obtida a partir da equação 8 através da atenuação total (α).

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d \quad (8)$$

onde α_c é a atenuação do condutor, que pode ser obtido pela equação 9.

$$\alpha_c = \frac{R_1 + R_2}{Z_c}$$

$$R_1 = \frac{R_m}{W} L_R \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{\pi^2} \ln \frac{4\pi W}{T} \right) \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{R_m}{W} \frac{W/H}{(W/H) + 5,8 + 0,03(H/W)}$$

$$R_m = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$$

onde L_R é a razão de perda e é definida como 1 para $W/H \leq 0,5$ ou para $0,5 < W/H \leq 10$, utiliza-se $L_R = 0,94 + 0,134(W/H) - 0,0062(W/H)^2$.

Para calcular a atenuação total α , pode-se utilizar a equação 10.

$$\alpha = \frac{\pi f_n \sqrt{\varepsilon_{reff}}}{c Q_0}$$

$$Q_0 = \frac{Q_L}{\sqrt{1 - 2|S_{21}|^2}} \quad (10)$$

$$Q_L = \frac{f_n}{2\Delta f_n}$$

Catarinucci *et al.* (CATARINUCCI *et al.*, 2017) demonstraram que os valores de ε_r e $\tan \delta$ do substrato também podem ser obtidos utilizando-se simuladores eletromagnéticos, através de dois programas diferentes. Foram modeladas as microlinhas com os ressonadores em T em cada um dos simuladores. Como o simulador produz curvas dos parâmetros S_{11} e S_{21} , pode-se verificar que quando os valores de ε_r e $\tan \delta$ do substrato são muito próximos dos valores encontrados no substrato real, as curvas de S_{11} e S_{21} simuladas se aproximam muito das curvas de S_{11} e S_{21} obtidas pelo VNA. Essa informação pode ser utilizada tanto para confirmar os resultados obtidos pela modelagem matemática, como o próprio simulador pode ser utilizado para estimar os valores de ε_r e $\tan \delta$.

4.4 Configuração do processo de impressão utilizando ABS e ABSg

Para realizar a impressão das placas de testes e da lente dielétrica foram adotados parâmetros de impressão compatíveis com o uso do ABSg. O ABSg trabalha com temperaturas entre 230 e 260 °C. A cabeça de impressão *Diamond* normalmente trabalha com temperaturas entre 15 e 20 °C acima da temperatura convencional durante os processos de misturas de filamentos, sendo que nos testes iniciais, a

temperatura encontrada para o processamento da mistura entre ABS e ABSg foi 245 °C, sendo a temperatura definida para os processos de impressão para a cabeça *Diamond*. Para a mesa de impressão, foi utilizada a temperatura de 110 °C, sendo compatível com as especificações do ABSg, onde são recomendadas temperaturas entre 100 e 120 °C para uso na mesa de trabalho. Em testes preliminares, temperaturas inferiores a 110 °C apresentaram descolamentos ocasionais de partes das camadas durante a impressão.

Durante o processo de impressão com material ABS, é necessário que a impressora seja mantida isolada do ambiente, evitando variações bruscas de temperatura nas peças que estão sendo impressas. O material ABS necessita de um gradiente lento de resfriamento para evitar deformações ocorridas por retração do material. Se correntes de ar frio atingirem a peça durante a impressão, poderá ocorrer empenamento ou descolamento de camadas, prejudicando ou invalidando toda a impressão. Para evitar este tipo de problema, a impressora deve ser coberta com a capa protetora.

Como a impressora possui base de vidro temperado na mesa de impressão, é necessário que seja aplicada uma cola a base de água e polivinilpirrolidona (PVP). Esta cola fornece a adesão necessária a primeira camada de impressão, evitando que fio aquecido se descole da mesa.

Nas configurações do programa de fatiamento, a velocidade de impressão foi mantida em 35 mm/s para perímetros e preenchimentos internos, 25 mm/s para impressão de camadas superiores e inferiores e velocidade fixa de impressão em 15 mm/s para a primeira camada (camada de adesão a mesa). Outro parâmetro de impressão importante para evitar entupimentos na cabeça de impressão *Diamond*, o parâmetro de retração foi definido em 1 mm, que é o recolhimento do filamento em processos de movimentação da cabeça sem impressão. Este valor normalmente é de 3 mm para a cabeça de impressão *Diamond*, o que evitaria totalmente a formação de linhas durante este tipo de movimento. Nos testes preliminares de impressão, a configuração de 3 mm na retração provocava um excesso de entupimentos no duto do filamento ABSg. Com o valor de 1 mm para retração, apesar de deixar algumas linhas durante o movimento sem impressão, resolve-se o problema com os entupimentos no duto do filamento ABSg. Nas configurações da largura da trilha de extrusão, o valor é definido pelo programa como sendo o diâmetro da saída do bico de extrusão, que é de 0,6 mm, porém é esperado que esse valor sofra alguma

variação mínima durante a impressão, sendo compensado pelo próprio programa de fatiamento.

4.5 Resultados da caracterização do ABSg

O primeiro passo foi realizar a caracterização do ABSg, onde foram impressas três placas de tamanhos padronizados de $100 \times 40 \text{ mm}^2$ com espessuras de 1,6 mm para desempenharem o papel de substratos para microlinhas. Nas placas impressas, foram coladas folhas autoadesivas de cobre com espessura de 0,1 mm nos dois lados. Em uma das faces foi cortada parte da folha de cobre formando uma microlinha. No centro da microlinha foi deixada uma parte da folha de cobre para formar um ressonador em “T”, conforme apresentado na Figura 12. Foram soldados conectores do tipo SMA nos dois lados da microlinha. Os parâmetros S_{11} e S_{21} foram coletados com o auxílio de um equipamento do tipo VNA e o simulador eletromagnético CST (CST STUDIO SUITE, 2020) foi utilizado para simular as curvas S_{11} e S_{21} para comparação e obtenção dos valores da permissividade elétrica relativa e da tangente de perdas.

O primeiro parâmetro analisado foi a altura da camada impressa. Em impressoras do tipo FDM, a impressão é feita em camadas e a adesão de cada camada depende essencialmente de dois fatores: a temperatura da mesa de impressão e a altura de cada camada.

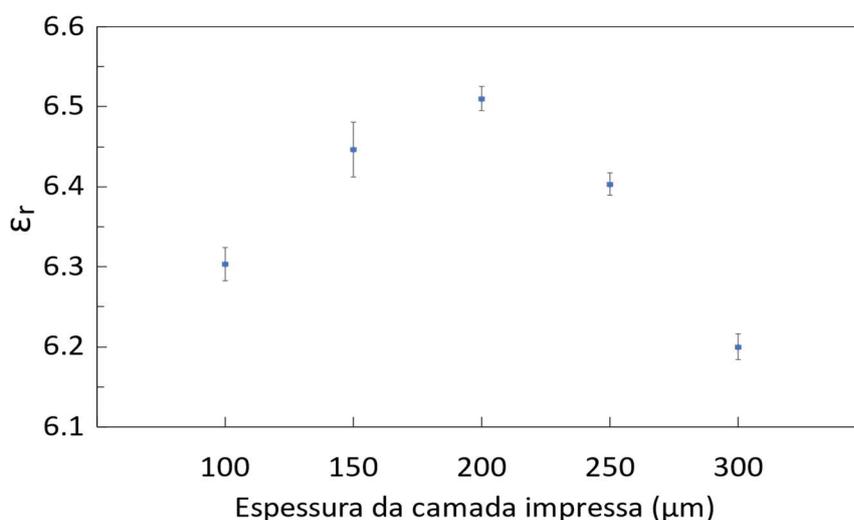
A temperatura da mesa de impressão afeta diretamente a adesão entre as camadas. O material polimérico já depositado deve estar em uma determinada temperatura para que o material que está sendo depositado possa se ligar através de ligações químicas secundárias ao material que já foi depositado.

A espessura da camada, que pode ser definida nas configurações do programa de fatiamento, afeta diretamente as propriedades mecânicas do objeto impresso. Camadas mais espessas interferem na adesão com a camada anterior. A falta de compactação do material depositado acaba por produzir pequenos espaços vazios, que afetam as propriedades mecânicas e visuais do objeto impresso. Camadas menos espessas proporcionam um melhor acabamento, maior compactação do material depositado e redução dos espaços vazios (normalmente preenchidos com ar) entre as camadas. Espaços vazios também podem aparecer em camadas menores que $150 \mu\text{m}$. O excesso de compactação provoca escoamento do

material e aparecimento de espaços vazios entre as camadas. No trabalho de Goulas *et al.*, é possível verificar que espaços vazios entre as camadas impressas podem ser minimizados em camadas com alturas entre 150 e 200 μm (GOULAS *et al.*, 2020).

A Figura 13 apresenta a permissividade relativa de vários substratos impressos, utilizando várias configurações de espessura das camadas durante a impressão, variando de 100 a 300 μm , com filamento ABSg. A permissividade relativa (ϵ_r) foi minimamente afetada por variações na espessura da camada impressa. Valores superiores a 300 μm , mais da metade do diâmetro do bocal da extrusora, produziram menores valores de ϵ_r , devido à presença excessiva de espaços vazios. Também ocorre a redução da adesão entre as camadas, reduzindo as qualidades mecânicas das placas impressas. A espessura da camada em 200 μm possui o maior valor para a permissividade relativa (ϵ_r), sendo o valor adotado para a continuação dos trabalhos.

Figura 13 - Permissividade relativa do ABSg em função da altura da camada impressa.



Fonte: Próprio autor

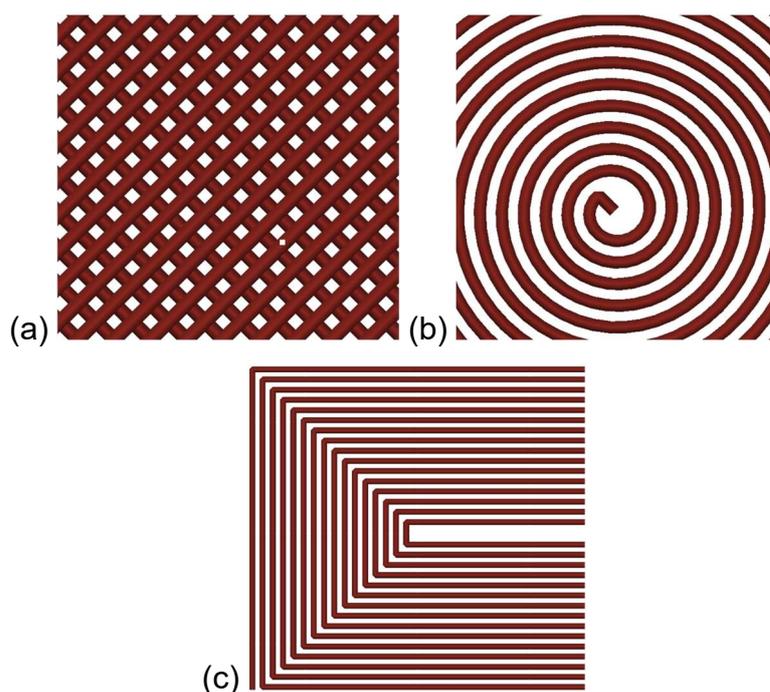
O segundo parâmetro analisado foi o padrão de preenchimento, que afeta a forma como o material é depositado no interior do objeto e é responsável pela resistência mecânica e adesão entre camadas. Como o processo de impressão por mistura de filamentos é utilizado para demonstrar que é possível imprimir objetos com constante dielétrica específica, a densidade de preenchimento (atributo “*Fill density*”, no PrusaSlicer) foi mantida em 100%, que indica que o preenchimento no interior do

objeto deve ser total, sem a existência de espaços vazios criados por padrões hachurados.

Quando a densidade de preenchimento é ajustada para 100%, não existem espaços entre as linhas depositadas. Apenas a forma como as linhas são depositadas no interior do objeto é afetado durante a impressão. Os padrões “*Rectilinear*” (Figura 14a), “*Archimedian Chords*” (Figura 14b) e “*Concentric*” (Figura 14c) foram testados na espessura da camada de 200 μm . Os três padrões apresentaram resultados semelhantes, indicando que em densidades de preenchimentos em 100%, o padrão utilizado não afeta a permissividade relativa (ϵ_r) do objeto impresso. Os padrões apresentados na Figura 14 são apenas para ilustração, em densidades de 100% de preenchimento, as linhas são depositadas lado a lado, não sobrando espaços vazios no padrão interno.

Para entender como o processo de impressão por mistura de filamentos pode afetar os valores de ϵ_r dos objetos impressos, foram feitas impressões de diversas proporções de misturas de filamentos. Para cada proporção foram impressas três placas nas dimensões de 100 x 40 x 1,6 mm³. Estas placas foram utilizadas como substratos para microlinhas e o processo de produção de microlinhas da seção 4.3 foi utilizado para caracterização dos substratos impressos.

Figura 14 - Padrões de preenchimento utilizados nos testes de impressão. “*Rectilinear*” (a), “*Archimedian Chords*” (b) e “*Concentric*” (c).



Fonte: Próprio autor

4.6 Resultados da caracterização do processo de mistura de filamentos com ABS e ABSg

Os parâmetros S_{11} e S_{21} foram coletados com o auxílio de um equipamento do tipo VNA e o simulador eletromagnético CST foi utilizado para simular as curvas S_{11} e S_{21} para comparação e obtenção dos resultados da permissividade relativa ϵ_r e tangente de perdas $\tan \delta$ dos substratos impressos. Alguns exemplos das microlinhas produzidas para se medir o ϵ_r dos substratos são apresentados na Figura 15a.

Ao se analisar a ampliação da placa impressa para a microlinha na Figura 15b, é possível verificar que não ocorre uma mistura real dos filamentos, eles saem fundidos lado a lado. A intercalação de cores amarelo e preto ocorre porque ao deslocar a cabeça da esquerda para a direita, um dos materiais dos filamentos fica na parte superior no fio depositado, ao fazer o movimento contrário, o outro material do filamento fica na parte superior.

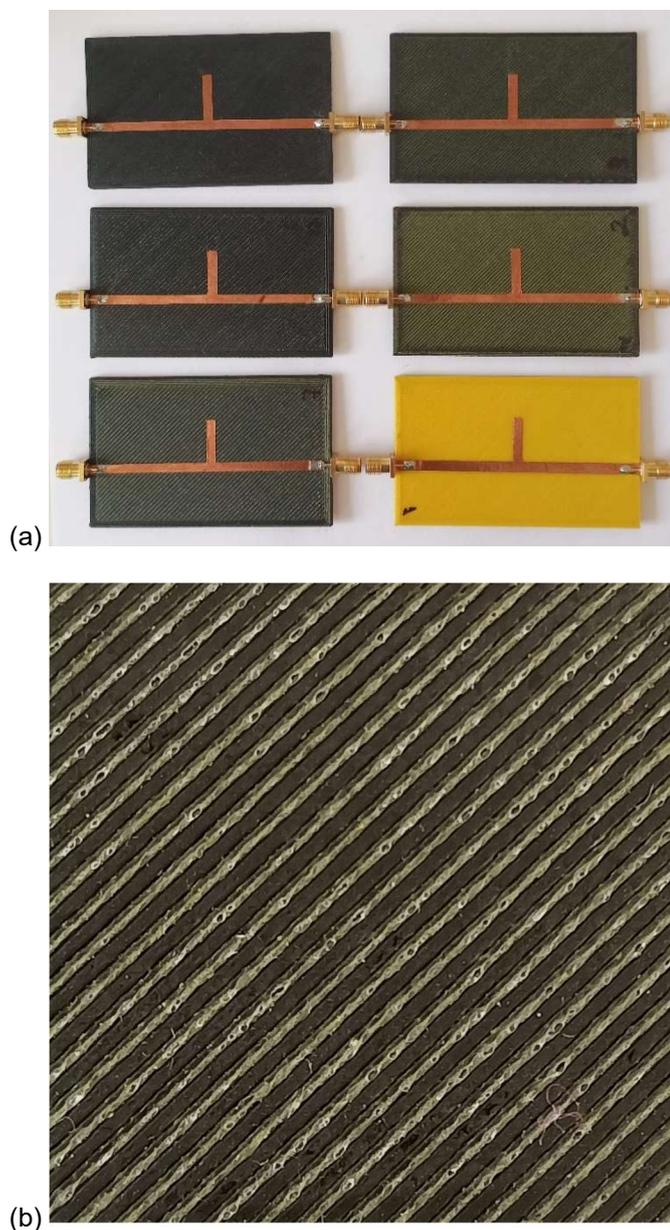
Também é possível verificar que o filamento amarelo possui algumas pequenas bolhas ao longo do seu caminho. Existem duas possibilidades para a ocorrência dessas bolhas. O ABS é higroscópico e absorve umidade do ar que se desprende durante o processo de aquecimento e saída pelo bico. Outra possibilidade é que o ABS convencional possui temperatura máxima de impressão de 250 °C, sendo entre 230 e 235 °C a sua temperatura ideal de trabalho. Ao se trabalhar muito próximo de sua temperatura limite, uma pequena degradação térmica pode ocorrer no ABS, liberando gases no processo.

O ABS amarelo é extrudado muito próximo a sua temperatura limite de extrusão, favorecendo o desprendimento de alguns materiais voláteis presentes no ABS. Verificou-se que a placa amarela (100% de ABS) também possui algumas bolhas, mas em quantidade menores que as peças que possuem mistura de filamento. Isso pode ser atribuído a presença do ABSg que, por possuir alta carga de carbono e ser da cor preta, retém calor por mais tempo, favorecendo uma maior liberação desses materiais voláteis presentes no ABS.

A Figura 16 apresenta os resultados dos testes de impressão com a mistura de filamentos ABS e ABSg. A espessura das camadas foi mantida em 200 μm e o padrão de preenchimento foi definido como “*Rectilinear*” com 100% de densidade de preenchimento. Os valores medidos para a permissividade relativa foram para

frequências próximas a 2.4 GHz. No ABSg esse valor foi de 6.5 e para o ABS foi de 2.6.

Figura 15 - (a) Fotos de algumas microlinhas produzidas para se medir o ϵ_r dos substratos. (b) Ampliação da microlinha com 75% de ABSg na mistura.

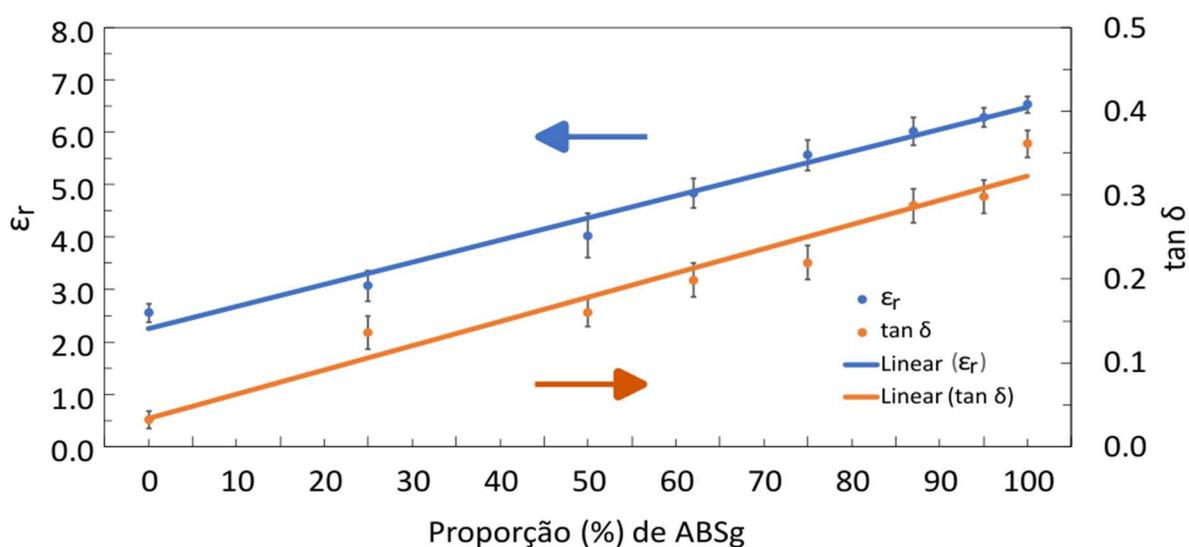


Fonte: Próprio autor

Analisando o gráfico, verifica-se que o valor de ϵ_r varia quase que linearmente com a quantidade de ABSg na mistura dos filamentos. Apesar de existirem pequenos desvios, essa variação linear facilita o cálculo para proporções intermediárias, dispensando o acréscimo de mais pontos ao gráfico para identificar os valores de ϵ_r intermediários entre os pontos. Pelos resultados obtidos até aqui, verifica-se que o

processo de impressão por mistura de filamentos, utilizando 100% da densidade de preenchimento e com camadas com alturas de 200 μm , dependem apenas das proporções dos materiais utilizados na entrada. Estes resultados são semelhantes aos apresentados por Mei, Bai e Cui, onde a equação 1 foi utilizada para determinar a constante dielétrica em regiões perfuradas em metamateriais, onde a permissividade relativa ϵ_r , de uma região é dada pela proporção dos volumes dos materiais utilizados na sua construção (MEI; BAI; CUI, 2010)

Figura 16 - Permissividade relativa (linha azul) e tangente de perda (linha laranja) devido à mistura de ABS natural e ABSg.



Fonte: Próprio autor

Também foi analisada a tangente de perdas dos substratos impressos com mistura entre ABSg e ABS. A tangente de perdas é uma grandeza física importante, uma vez que mede capacidade do material em absorver radiação eletromagnética. Determinadas aplicações necessitam de materiais com tangente de perdas baixa, como no caso de filtros, ou o sinal eletromagnético poderá ser excessivamente atenuado. Em outras aplicações, como no caso de absorvedores, é comum o uso de materiais com tangente de perdas alta, uma vez que sua principal função é absorver a radiação eletromagnética, evitando sua propagação. Para o ABSg, a tangente de perdas foi estimada em 0,361 em frequências próximas a 2,4GHz. Já para o ABS foi de 0,032.

Analisando os resultados de $\tan \delta$ na Figura 16 (curva alaranjada), verifica-se que a tangente de perdas também aumenta de forma proporcional ao aumento da

concentração de ABSg no substrato impresso, de forma quase linear, facilitando os cálculos para valores intermediários. Apesar de nenhum trabalho pesquisado detalhar como é a composição da tangente de perdas, é razoável afirmar que ela segue o mesmo princípio apresentado por Mei, Bai e Cui (MEI; BAI; CUI, 2010) para a permissividade elétrica relativa, sendo o valor da tangente de perdas definido pela proporção dos materiais utilizados em uma determinada região do objeto impresso.

Com estes resultados, é possível afirmar que a técnica é eficaz na produção de materiais com diferentes valores da constante dielétrica, sem a necessidade de reduzir a densidade de preenchimento ou a colocação de furos no objeto, evitando espaços vazios ao longo do corpo do objeto impresso.

Como a constante dielétrica do ABSg está associada à presença de carbono em sua composição, pode-se afirmar que o processo de mistura de filamentos dilui esta carga de carbono. A adição de ABS convencional na mistura de filamentos reduz a carga de carbono, o que também reduz o valor da constante dielétrica do material na saída do bico de impressão.

Como a cabeça de impressão *Diamond* possui um furo de saída do material no bico com diâmetro de 600 μm , qualquer objeto pode ser impresso nos eixos X e Y com resolução de até 600 μm . Detalhes menores que 600 μm não podem ser reproduzidos, por possuírem tamanho inferior ao fio aquecido de impressão.

No eixo Z, a resolução é limitada a 200 μm , que é a espessura da camada, não sendo possível reproduzir detalhes no eixo Z menores que a espessura da camada. O programa de fatiamento ajusta automaticamente a resolução do eixo Z para que o objeto tenha detalhes em múltiplos de 200 μm .

5. UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE IMPRESSÃO POR MISTURA DE FILAMENTOS EM UMA APLICAÇÃO REAL

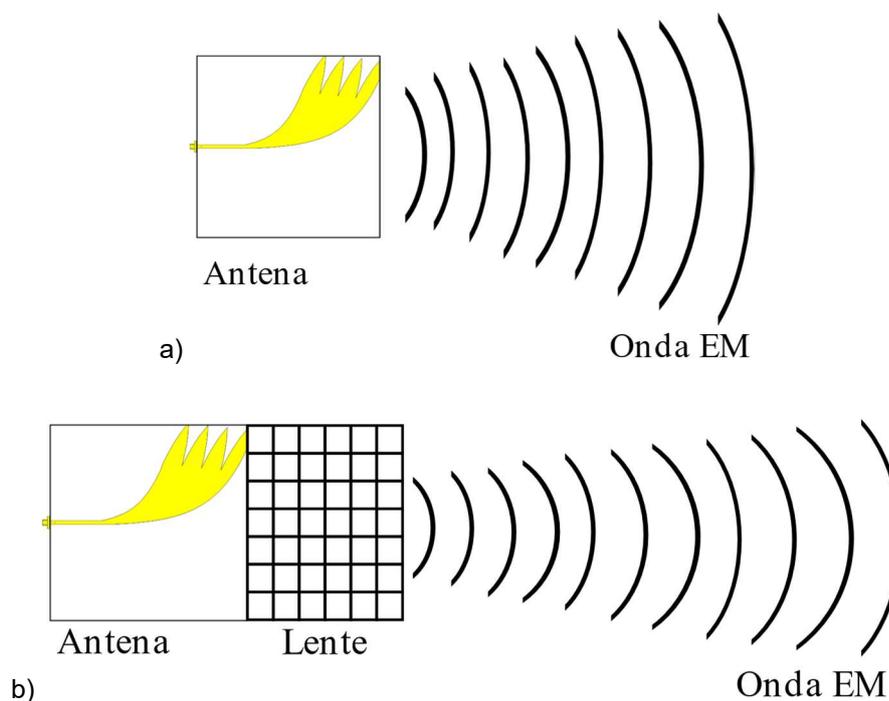
Com todo o processo de impressão de objetos com variação da permissividade elétrica por mistura de filamentos validado, aplicações reais podem ser desenvolvidas com esta técnica. Diversos tipos de objetos podem ser construídos, já que a técnica permite a impressão de objetos que possuam constantes dielétricas específicas ou que possuam algum tipo de gradiente dielétrico ou objetos do tipo GRIN que possuam um gradiente de índices de refração. As proporções podem ser livremente definidas entre os valores das constantes dielétricas dos filamentos utilizados, permitindo a construção de qualquer tipo de objeto produzido pelas técnicas anteriormente estudadas.

5.1 Desenvolvimento da lente focalizadora utilizando gradiente dielétrico

Para confirmar a viabilidade da técnica, a primeira aplicação foi planejada de forma a não utilizar nenhum tipo de superfície curvada ou inclinada, exatamente para demonstrar que os efeitos apresentados existem exclusivamente pela variação do gradiente dielétrico. Ao se fazer uma revisão da literatura, verificou-se que existem diversos tipos de dispositivos já desenvolvidos que podem fazer uso de um gradiente dielétrico. Um dispositivo em especial, a lente dielétrica, pode ser desenvolvida em diversos formatos e padrões de variação do gradiente dielétrico. (GOULAS *et al.*, 2020; MEI; BAI; CUI, 2010; ZHANG *et al.*, 2016). A revisão também mostrou que lentes podem possuir variações geométricas para melhorar o desempenho de antenas na faixa do micro-ondas (DE OLIVEIRA *et al.*, 2019). De forma a garantir que os resultados da lente fossem gerados apenas pela variação dielétrica, foi evitado o uso de geometrias curvadas no processo de desenvolvimento da lente dielétrica.

A Figura 17a apresenta um esquema simplificado da onda eletromagnética transmitida pela antena. Ao se desacoplar da antena a onda eletromagnética se espalha no ambiente, seguindo um padrão de abertura, que é conhecido como abertura angular. Essa abertura angular é uma característica do padrão de irradiação da antena, sendo um parâmetro que possui limites de otimização, dependendo de diversos fatores existentes no processo de desenvolvimento da antena. Uma das formas de se reduzir essa abertura angular, aumentando a quantidade de energia entregue em uma determinada distância é utilizando-se uma lente focalizadora.

Figura 17 – Esquema simplificado do funcionamento de uma antena (a). Esquema simplificado do funcionamento de uma antena com lente dielétrica (b).



Fonte: Próprio autor

Conforme apresentado no esquema simplificado da Figura 17b, a lente pode concentrar a onda eletromagnética na saída da antena, reduzindo sua abertura angular. Ao fazer isso, uma maior quantidade de energia pode ser entregue em uma distância maior, quando comparada com a versão que não utilizou a lente. A lente proposta foi do tipo dielétrica, onde a onda eletromagnética atravessa diferentes áreas internas, com diferentes ϵ_r e conseqüentemente diferentes n (índices de refração), produzindo o efeito focalizador semelhante ao descrito por Mei, Bai e Cui (MEI; BAI; CUI, 2010) em seu trabalho.

A lente dielétrica desenvolvida foi do tipo planar, acompanhando o formato da antena, sem o uso de nenhum tipo de geometria curvada no seu desenvolvimento. O trabalho usa como base emissora de micro-ondas uma antena do tipo *Palm Tree Antipodal Vivaldi* (AVA) UWB com frequência de operação entre 1.4 e 3.5 GHz. Esta antena possui diversos trabalhos documentados (DE OLIVEIRA *et al.*, 2015), mostrando suas propriedades e desempenho em um amplo espectro de frequências, sendo utilizada em diversos campos de pesquisa, incluindo uso em radar de campo próximo (NURHAYATI *et al.*, 2020), geração de imagens médicas utilizando micro-

ondas (DE OLIVEIRA *et al.*, 2017, 2021) e para irradiação de micro-ondas para aplicações que necessitem de redução bacteriológica (DE OLIVEIRA *et al.*, 2019)

O projeto da lente dielétrica tem como objetivo principal uma melhora na entrega de energia em uma distância maior. Para que isso seja possível, a lente deve atuar como um concentrador das ondas eletromagnéticas, semelhante ao que ocorre em lentes convexas, que colimam feixes de luz. O projeto também deve evitar que o sinal da antena seja refletido pela lente de volta para a antena, produzindo retorno do sinal, que prejudica o desempenho geral da antena e pode acabar comprometendo o circuito gerador de micro-ondas.

No processo de desenvolvimento da lente, foi levado em consideração que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas é inversamente proporcional à constante dielétrica, conforme a equação 11.

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (11)$$

onde v_p é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio em questão, c é a velocidade de propagação na luz no vácuo, μ_r é a permeabilidade magnética do meio e ϵ_r é a permissividade elétrica do meio. Como o meio é um material polimérico e este tipo de material tem natureza paramagnética, seu valor μ_r é ligeiramente maior que 1, então a equação 11 pode ser aproximada para a equação 12, onde verifica-se que a velocidade de propagação da onda é inversamente proporcional à permissividade elétrica do meio.

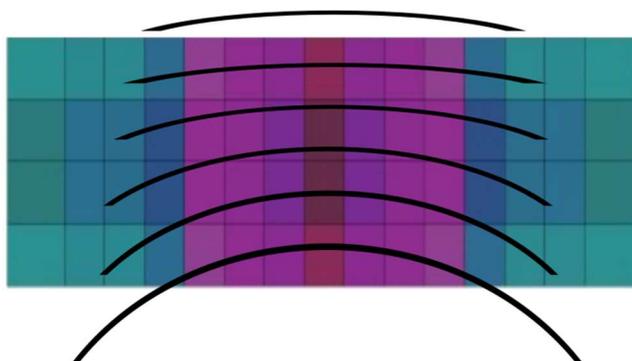
$$v_p \cong \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (12)$$

O funcionamento de uma lente com gradiente dielétrico é apresentado na Figura 18 e consiste em ter uma região central com constante dielétrica mais alta, forçando parte da onda eletromagnética a viajar em uma velocidade menor na região central. Nas laterais, são utilizadas regiões com constante dielétrica mais baixa, onde a onda pode viajar mais rapidamente. Este processo força a frente da onda, que normalmente apresenta uma forma curvada na saída da antena, a reduzir sua curvatura. Com isso, ocorrerá maior acúmulo de energia próximo à região central da

saída da lente, reduzindo o ângulo de abertura do feixe e, conseqüentemente, aumentando a quantidade de energia que pode ser entregue na mesma distância.

Todo o projeto da lente foi realizado com o auxílio do simulador eletromagnético CST (CST STUDIO SUITE, 2020). Para cada arranjo dielétrico testado na lente, foi simulado o ganho em campo distante (entrega de mais energia em um alvo distante) e a curva do parâmetro S_{11} . Essa curva apresenta o sinal retornado ao transmissor e deve ser o mais próximo possível da curva S_{11} que a antena já produz. Caso a lente produza curvas do parâmetro S_{11} piores que a curva da antena, isto indicará que a lente está refletindo as ondas eletromagnéticas de volta para a antena.

Figura 18 – Esquema simplificado do funcionamento da lente dielétrica.



Fonte: Próprio autor

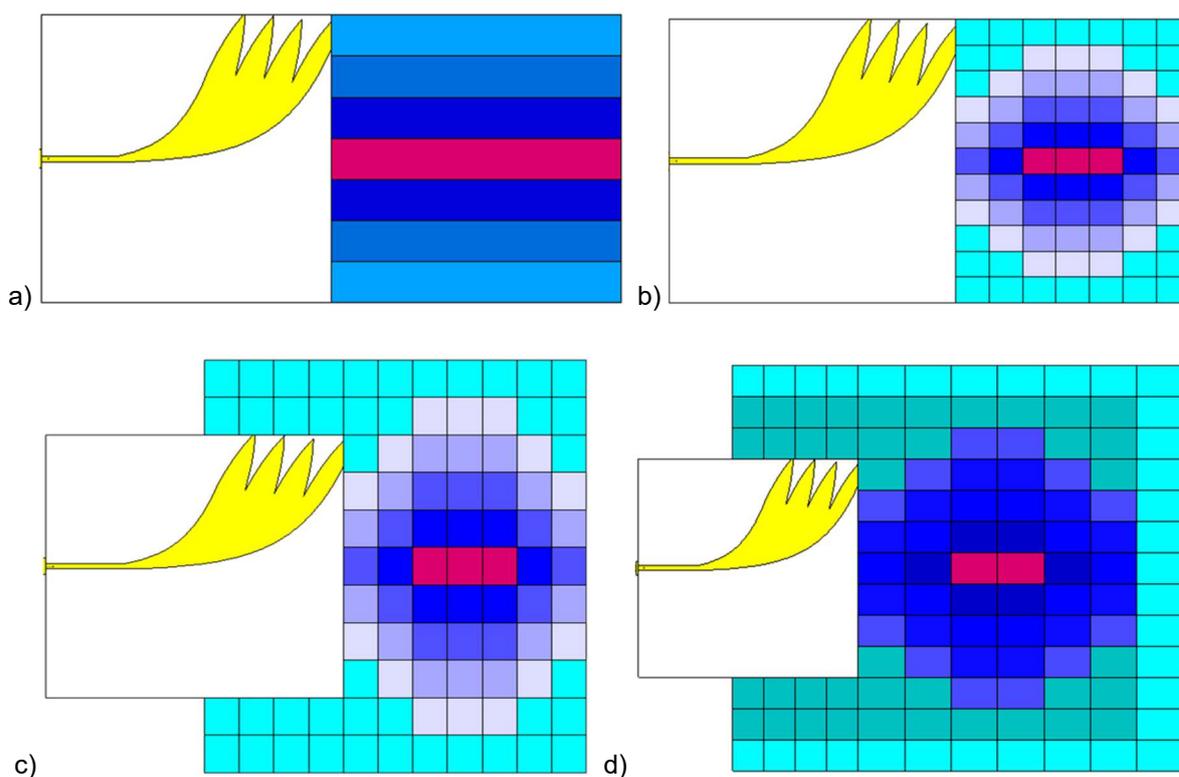
Quando a curva S_{11} do conjunto lente e antena é semelhante a curva S_{11} da antena, afirma-se que existe um bom acoplamento da lente com a antena. Todas as configurações que forneceram acoplamentos ruins entre a antena e a lente foram descartadas. Para definir o melhor arranjo dielétrico, dois parâmetros foram levados em consideração, o primeiro foi o “ganho em campo distante”, que é um parâmetro que define a intensidade de sinal transmitido ou recebido pela antena em campo distante, que ocorre a partir de 10λ , este parâmetro pode ser expresso em dBi, que indica o ganho da antena em relação a uma antena isotrópica ideal (que não possui perdas). O segundo parâmetro levado em consideração foi o parâmetro S_{11} . Como a antena já possui um parâmetro S_{11} característico dela, o conjunto lente e antena deverá ter seu parâmetro S_{11} o mais próximo possível do parâmetro S_{11} original da

antena, indicando que houve um bom acoplamento entre a lente e antena, sem prejudicar seu funcionamento original.

Para identificar a antena Vivaldi durante a discussão dos resultados, utilizou-se a nomenclatura AVA (*Antipodal Vivaldi Antenna*). Para o conjunto lente e antena foi adotada a nomenclatura LAVA (*Lens Antipodal Vivaldi Antenna*).

A Figura 19 apresenta o processo de modelagem em ordem cronológica das variações testadas no simulador da esquerda para a direita e de cima para baixo. As cores mais próximas ao azul claro representam valores de ϵ_r mais baixos, as cores roxa e vermelha representam valores de ϵ_r mais altos.

Figura 19 - Processo de modelagem do conjunto LAVA. A disposição dos conjuntos está em ordem cronológica da esquerda para direita de cima para baixo.



Fonte: Próprio autor

Inicialmente projetou-se uma lente que tivesse um valor de ϵ_r alto na região central (Figura 19a), que de acordo com a equação 12, v_p é inversamente proporcional a ϵ_r . O intuito é desacelerar a onda na região central, provocando uma redução de sua abertura angular. Vários gradientes de valores de ϵ_r foram testados no formato de barras horizontais visando identificar a melhor configuração. Como as

barras produzem exatamente a mesma variação ao longo do eixo Y e o acoplamento da lente e antena estava apresentando resultados inferiores ao parâmetro S_{11} original da antena, optou-se por realizar um aumento gradual do valor ϵ_r ao longo do eixo X da lente.

Esse aumento gradual melhorou significativamente o acoplamento entre a antena e a lente (Figura 19b), produzindo parâmetros S_{11} mais próximos dos obtidos com a antena. Isso indicou que o aumento gradual no valor dos ϵ_r nas diversas partes da lente, minimizou a reflexão, que ocorre por diferenças significativas nos valores de ϵ_r entre a interface dos materiais. A distribuição dos valores de ϵ_r e na quantidade de partes foi continuamente otimizada, alterando-se a quantidade de divisões entre gradiente de ϵ_r , indo de um menor valor de ϵ_r para as bordas para um maior valor de ϵ_r na região central, convergindo para a configuração mostrada na Figura 19b.

Como a antena apresentava uma certa quantidade de radiação eletromagnética sendo emitida pelas suas laterais, optou-se por estender as laterais da lente. Após algumas otimizações nos valores de ϵ_r , chegou-se à configuração da Figura 19c, onde houve melhora significativa do parâmetro S_{11} e do ganho em campo distante. Já havia sido identificado que a redução gradual dos valores de ϵ_r levava a uma menor reflexão entre as partes da lente e uma melhora no parâmetro S_{11} . O mesmo fenômeno foi verificado na camada externa da lente na interface com ar. Uma camada adicional contendo o valor mais baixo de ϵ_r foi adicionado à parte externa da lente, para reduzir a diferença nos valores de ϵ_r na interface ar/lente. A lente foi otimizada até que fosse obtida a melhor combinação possível entre o ganho de campo distante e um parâmetro S_{11} muito próximo ao da antena sem a lente, obtendo-se a configuração da Figura 19d.

Ao final do processo de desenvolvimento e otimização, verificou-se que a lente obteve o melhor acoplamento encontrado com a antena e houve melhora efetiva na entrega do sinal em campo distante.

A Figura 20 apresenta o modelo LAVA final projetado com o programa de simulação eletromagnética CST e os valores de ϵ_r finais para cada região da antena.

Após a finalização das simulações, o arranjo das variações da constante dielétrica (ϵ_r) que promoveram a melhor entrega de sinal em campo distante e o melhor acoplamento entre a antena e a lente é representado na Figura 20. Os valores estão distribuídos baseado nas cores, sendo o menor valor da constante dielétrica o

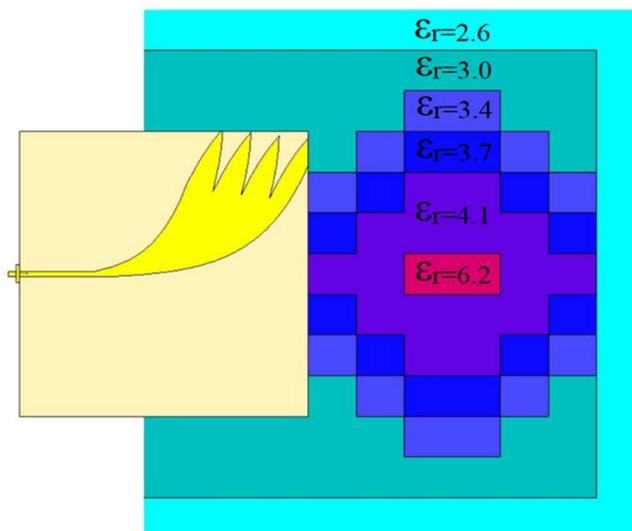
azul claro ($\epsilon_r = 2.6$), sendo o maior na parte interna, na cor vermelha, com $\epsilon_r = 6.2$. Os valores finais da constante dielétrica (ϵ_r) e da tangente de perdas ($\tan \delta$) são apresentados na Tabela 1 (da parte externa para a mais interna).

Tabela 1 - Valores de mistura de filamentos finais utilizados na composição da lente dielétrica.

ϵ_r	$\tan \delta$	% ABS	% ABSg
2,6	0,03	100	0
3,0	0,13	80	20
3,4	0,14	72	28
3,7	0,15	59	41
4,1	0,18	48	52
6,2	0,30	5	95

Fonte: Próprio autor

Figura 20 - Modelo da LAVA final projetado no simulador eletromagnético. A parte amarela é a antena e as partes em azul, verde, roxo e vermelho são componentes da lente.

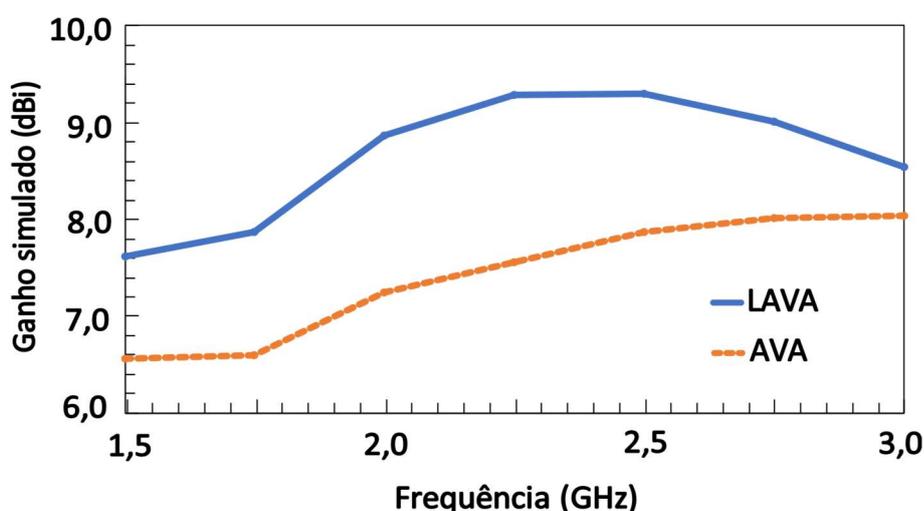


Fonte: Próprio autor

A Figura 21 apresenta os resultados para o ganho simulado das antenas AVA e LAVA após todo o processo de otimização da LAVA. Neste gráfico, é possível verificar que a lente mantém a principal característica da antena, que é sua aplicação UWB (*Ultra Wide Band*), produzindo ganhos em praticamente todas as frequências de operação. Nas frequências de 2,0 a 2,5 GHz, o ganho é superior a 1,5 dBi na LAVA em relação à AVA, chegando a um aumento de 1,98 dBi a 2,25 GHz. Em frequências

mais altas, o aumento do ganho do LAVA é menor, sendo 1,15 dBi em 2,75 e 0,58 dBi a 3,0 GHz. Normalmente uma lente do tipo focalizadora é projetada para operar em uma faixa de frequência muito restrita. Todo o desenvolvimento da lente sempre levou em consideração o ganho em campo distante e o acoplamento lente e antena em toda a sua faixa de operação da antena. Com isso foi possível encontrar um arranjo que permitisse que a lente produzisse ganhos reais praticamente todas as frequências de operação da antena.

Figura 21 - Ganho simulado (dBi) em função da frequência (GHz) no campo distante (LAVA e AVA).



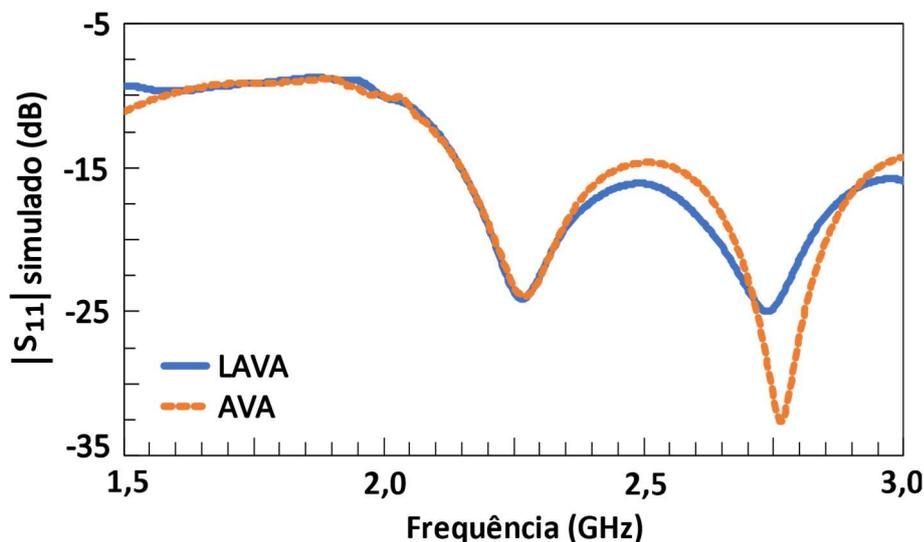
Fonte: Próprio autor

Conforme relatado anteriormente, o parâmetro S_{11} simulado da versão finalizada da LAVA foi calculado e é apresentado na Figura 22. O parâmetro S_{11} simulado está na escala de decibéis, identificando a potência do sinal eletromagnético, relacionado com a expressão $20\log_{10}$. No caso de antenas, o parâmetro S_{11} é relacionado a quantidade não absoluta do sinal retornado a fonte geradora do sinal. Zero dB no S_{11} indica que todo o sinal retornou a fonte, -10 dB equivale a um retorno de 1/10 do sinal, -20 dB a um retorno 1/100 e -30 dB a um retorno 1/1000 do sinal.

Entre as frequências de 1,5 e 2,35 GHz, a LAVA apresenta praticamente o mesmo comportamento de reflexão do sinal apresentado pela AVA, tendo um excelente acoplamento entre lente e antena. A partir dessa frequência, têm-se diferenças na ordem de 2 a 3 dB até a frequência de 2,7 GHz. Por estarem próximos ou abaixo de -15 dB, essas diferenças acabam sendo inferiores a 1,6% no sinal retornado. Em 2,76 GHz essa diferença é na ordem de 9 dB, mas como estão abaixo

de -25 dB, é uma diferença na ordem de 0,3% na diferença do sinal retornado. Isto é indicativo de um bom acoplamento entre a antena e a lente para todas as frequências analisadas.

Figura 22 – Parâmetro $|S_{11}|$ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para LAVA e AVA.



Fonte: Próprio autor

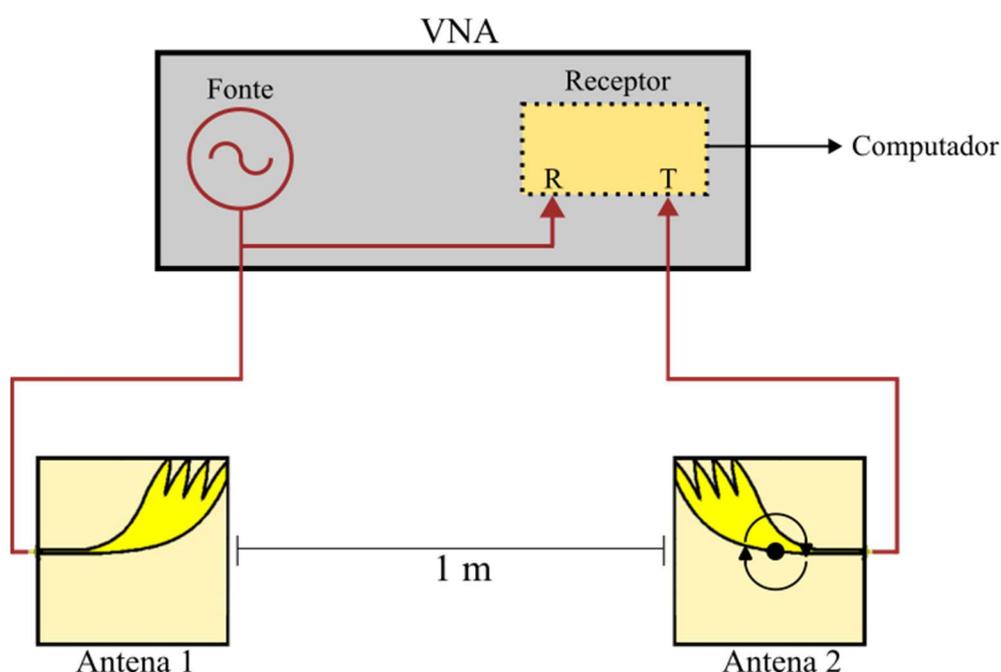
5.2 Impressão e caracterização da lente dielétrica

Para a impressão do protótipo da lente, uma impressora 3D do tipo FDM foi utilizada. Ela foi adaptada para trabalhar com uma cabeça de impressão do tipo *Diamond*, usando apenas dois dutos para filamento. O *firmware* também foi configurado e recompilado para trabalhar com comandos Gcode de mistura de filamentos. O filamento utilizado foi de ABS convencional na cor amarela para o filamento de valor ϵ_r baixo e o filamento com valor de ϵ_r alto foi o ABSg. Com os comandos Gcode apropriados, a impressora foi capaz de produzir na saída um fio com uma composição dos dois filamentos e variando suas proporções foram obtidos diversos valores de ϵ_r , entre o menor valor do ABS e o maior valor de ϵ_r do ABSg.

Para os testes de validação, foram medidos o diagrama de radiação da antena (AVA) e do conjunto lente e antena (LAVA). Um arranjo experimental semelhante ao esquema apresentado na Figura 23 foi montado utilizando uma antena *Vivaldi Palm Tree* (AVA) como antena emissora (antena 1), conectada à porta 1 do VNA. A 1 metro de distância, outra antena AVA foi montada em um pedestal giratório (antena 2) e conectada a porta 2 do VNA. No ângulo 0° , a antena 2 está apontada diretamente

para a antena 1. O suporte é girado no sentido horário e a cada 5° graus, e os valores para diversas frequências na porta 2 são registrados (parâmetro S_{21}). Após um giro de 360° e com todos os valores coletados, um diagrama de radiação da antena 2 (AVA) pode ser obtido. O mesmo processo é repetido acoplando-se a lente na antena 2, formando o conjunto LAVA. Com todos os dados coletados, o diagrama de radiação medido pode ser comparado com o diagrama de radiação simulado. Com a comparação, pode-se determinar se o processo de construção da lente com gradiente dielétrico por processos de mistura de filamentos em impressão 3D é consistente com as simulações (DE OLIVEIRA NETO *et al.*, 2023b).

Figura 23 – Esquema do circuito utilizado para as medidas do diagrama de radiação.



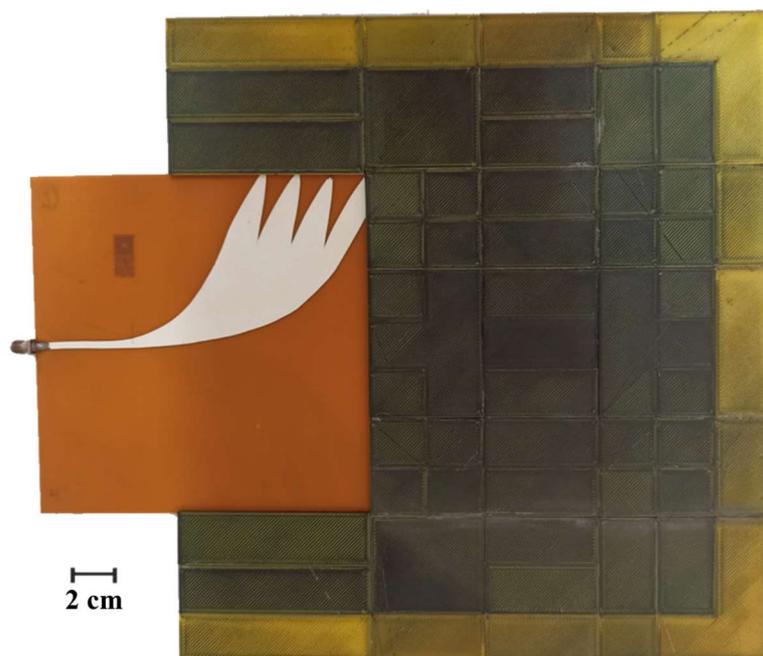
Fonte: Próprio autor

O protótipo impresso da lente foi feito em uma impressora Prusa I3 Rework, com área útil de impressão de 195×195 mm². A lente foi dividida em sete partes para impressão. A impressora 3D e o programa de fatiamento foram configurados para um processo padrão de impressão com filamento ABS. De forma a facilitar a constatação visual da ocorrência da mistura de filamentos, optou-se por utilizar um filamento de ABS convencional na cor amarela, contrastando visualmente com o filamento ABSg que é preto. A escolha da cor não tem qualquer impacto sobre as propriedades

dielétricas finais do objeto impresso, sendo um detalhe meramente visual para auxiliar no controle de deposição.

A mesa de impressão foi mantida a 110°C e a cabeça de impressão foi mantida a 245°C, mantendo os parâmetros de impressão utilizados para a impressão dos substratos da caracterização dielétrica. Em processos de impressão por mistura de filamentos onde ocorre troca de misturas, uma torre de limpeza (ou torre de purgamento) deve ser utilizada. Esta torre tem como finalidade gastar o material que fica dentro da cabeça durante a troca das proporções de mistura, favorecendo a saída do material que está dentro da cabeça de impressão com a mistura anterior. Foi selecionada como medida para a torre de limpeza, o purgamento de 80 mm de material durante a mudança da proporção no processo de impressão por mistura. O tempo total de impressão foi de 60 horas.

Figura 24 - Protótipo impresso da LAVA.

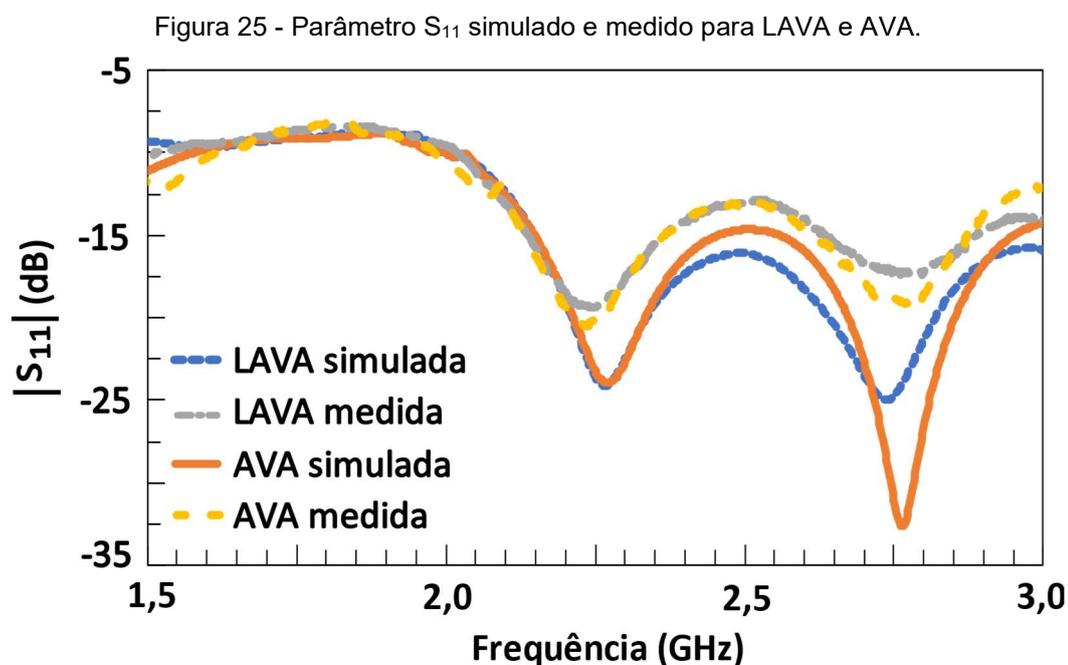


Fonte: Próprio autor

A Figura 24 apresenta o protótipo da lente impressa acoplada à antena (LAVA). Apesar da parte mais externa da lente ser impressa apenas com filamento ABS amarelo, essa região é um ligeiramente mais escura. Isso se deve à presença de uma pequena quantidade de filamento ABSg, que é preto. Essa quantidade de ABSg é residual e acaba sendo empurrada para a saída do bico, mesmo sem ocorrer

tração do filamento de ABSg. Esta situação é normalmente evitada nas cabeças de impressão tipo *Diamond*, com retração de 3 mm do filamento não utilizado no tracionador, mas esta ação causava constante entupimento no duto do filamento ABSg e optou-se por não utilizar retração superior a 1 mm, durante as impressões.

A Figura 25 apresenta o parâmetro S_{11} simulado obtido com o auxílio do programa de simulação eletromagnética CST e o medido com o auxílio do VNA da antena (AVA) e do conjunto lente mais antena (LAVA). Ao analisar o gráfico dos parâmetros S_{11} , verifica-se que a curva cinza, dos valores medidos da LAVA é semelhante aos valores da curva amarela, que são os valores medidos para a AVA (antena). Isto indica que a lente não altera o comportamento do parâmetro S_{11} original da antena, sendo indicativo do bom acoplamento existente entre a lente e a antena.

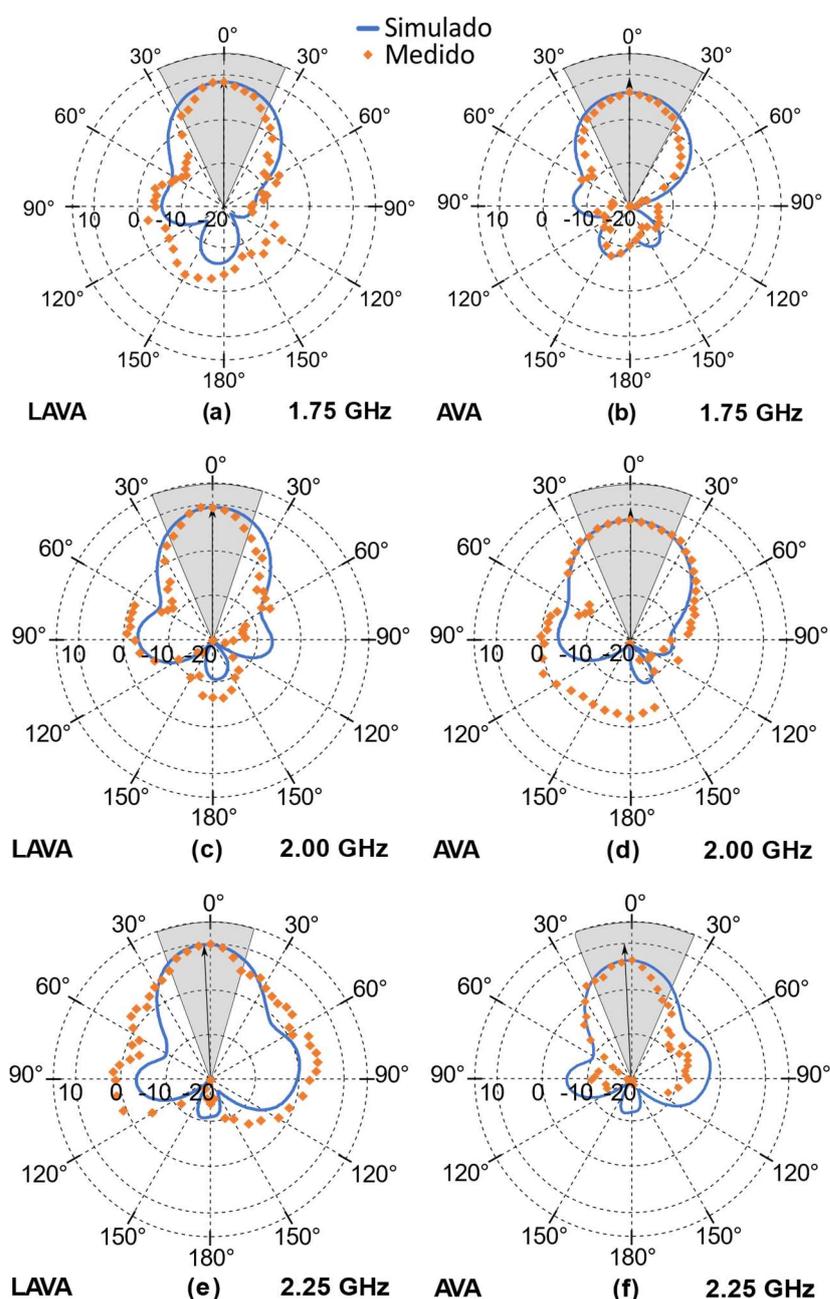


Fonte: Próprio autor

A Figura 26 apresenta os diagramas de radiação simulados e medidos da LAVA e AVA a 1,75; 2,00 e 2,25 GHz. Os contornos dos diagramas de radiação mostram que a versão impressa do protótipo da LAVA é consistente com a versão simulada, indicando que a técnica de impressão por mistura de filamentos foi eficiente na produção de estruturas com constantes dielétricas específicas. A AVA é conhecida por apresentar pequeno estrabismo e a o conjunto lente e antena não afeta essa condição, apresentando valores equivalentes de estrabismo.

O aumento do ganho pode ser verificado consultando a Tabela 2 pelo aumento da magnitude do lóbulo principal (MLM), que a 2,25 GHz aumentou de 7,80 dBi (f) na AVA para 9,78 dBi (e) na LAVA, sendo um aumento de 1,98 dBi. A 2,00 GHz, o MLM aumentou de 7,44 dBi (d) da AVA para 9,30 dBi na LAVA, sendo um aumento de 1,86 dBi e a 1,75 GHz, aumentou de 6,69 dBi (b) na AVA para 8,16 dBi (a) na LAVA, sendo um aumento de 1,47 dBi.

Figura 26 - Diagramas de radiação simulados (linhas azuis) e medidos (símbolos laranja) no plano xz para: (a) LAVA a 1,75 GHz, (b) AVA a 1,75 GHz, (c) LAVA a 2,00 GHz, (d) AVA a 2,00 GHz, (e) LAVA a 2,25 GHz e (f) AVA a 2,25 GHz.



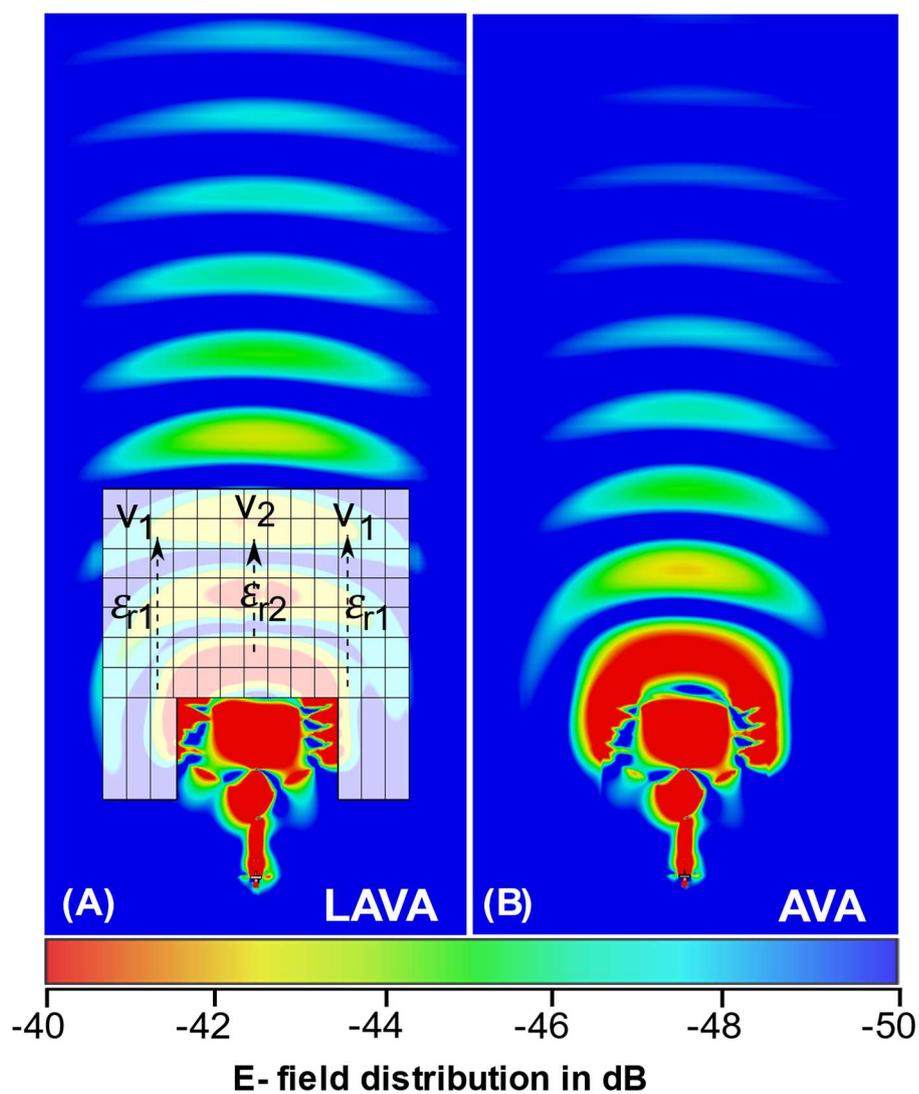
Fonte: Próprio autor

Tabela 2 - Valores do lóbulu principal, abertura angular e ganho obtidos através do diagrama de radiação para as versões simuladas e físicas da LAVA e AVA.

Freq. (GHz)	Abertura angular (°) LAVA	Abertura angular (°) AVA	Redução da abertura angular (°) em relação a AVA	MLM (dBi) LAVA	MLM (dBi) AVA	Aumento do MLM (dBi) em relação a AVA
1,75	48,6	55,0	6,4	8,16	6,69	1,47
2,00	41,2	49,5	8,3	9,30	7,44	1,86
2,25	37,2	46,2	9,0	9,78	7,80	1,98

Fonte: Próprio autor

Figura 27 - Distribuição do campo elétrico em dB no plano xz a 2,25 GHz para LAVA (a) e AVA (b).

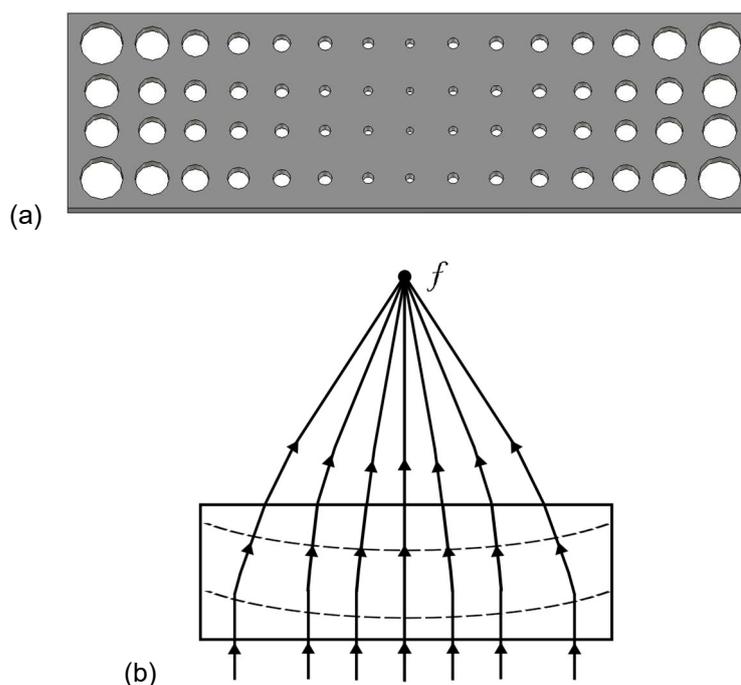


Fonte: Próprio autor

Embora existam várias regiões com constantes dielétricas diferentes dentro da lente, para fins de comparação, pode-se simplificar a lente em apenas três regiões distintas no plano xz , conforme mostrado na distribuição do campo elétrico da Figura 27, a lente é simétrica, o lado esquerdo e o lado direito têm os mesmos valores de ϵ_r (ϵ_{r1}). Os valores de ϵ_r do centro da lente foram identificados como ϵ_{r2} . Usando a equação da velocidade de propagação da onda (equação 12), verifica-se que a velocidade de propagação de onda é inversamente proporcional ao valor de ϵ_r , ou seja, se o valor de ϵ_r aumenta, a velocidade de propagação da onda diminui.

Em regiões com maior ϵ_r tem-se v_p menor, portanto, em regiões distintas onde $\epsilon_{r1} < \epsilon_{r2}$, observa-se que $v_1 > v_2$ (Figura 27a). Os lados possuem valores de ϵ_r muito menores que o centro, então a onda eletromagnética se move mais rápido nos lados do que na região central. Isso promove um acúmulo de energia na saída da lente, que pode ser visualizada na região verde e amarela (Figura 27a) na LAVA, se estendendo nas regiões verdes e azul claro, entregando mais energia no mesmo espaço. A largura angular também é reduzida, o que foi observado nas regiões cinza da Figura 26. Esse acúmulo de energia na região central é responsável pelo aumento da diretividade da antena, apresentando o ganho de 1,98 dBi na LAVA, em relação ao AVA, a 2,25 GHz, conforme discutido anteriormente.

Figura 28 - Esquema da lente focalizadora proposta por Mei, Bai e Cui em 2010.



Fonte: Próprio autor

Outra forma de se explicar o acúmulo de energia na saída da lente foi apresentada por Mei, Bai e Cui, em um trabalho sobre metamateriais (MEI; BAI; CUI, 2010). Aquele trabalho apresentou uma lente capaz de focar as ondas eletromagnéticas. O objeto mesclava o material com furos e produzia um conjunto de índices de refração internos, de forma semelhante ao exibido pela lente deste trabalho. Como o índice de refração é proporcional à permissividade elétrica relativa (equação 3), pode-se utilizar a mesma analogia aplicada por Mei, Bai e Cui para determinar os efeitos aqui obtidos.

Apesar de a lente deste trabalho seguir a mesma distribuição dielétrica do trabalho apresentado por Mei, a forma como o gradiente dielétrico está distribuído é semelhante, com constantes dielétricas mais baixas nas laterais, representada pelos furos com diâmetros maiores nas extremidades. A região central possui permissividade elétrica mais alta, produzida com furos menores. Uma representação esquematizada da lente é apresentada na Figura 28a (MEI; BAI; CUI, 2010).

A lente da Figura 28a apresenta permissividade elétrica maior no centro e menor nas laterais. Isto também ocorre na parte superior e inferior de forma semelhante à lente proposta neste trabalho. A lente, por possuir diversas constantes dielétricas distintas, acaba por curvar a trajetória dos feixes de micro-ondas de forma semelhante à produzido pela lente daquela investigação (MEI; BAI; CUI, 2010). A Figura 28b apresenta um esquema de como funciona a curvatura dos feixes de micro-ondas em direção a um ponto focal f .

O mesmo princípio pode ser aplicado à lente proposta neste trabalho. Como a lente possui diversas regiões distintas, com constantes dielétricas menores nas regiões mais externas e constantes dielétricas mais altas nas regiões internas, o efeito produzido é semelhante ao de uma lente focalizadora proposta por Mei, Bai e Cui, onde os feixes de micro-ondas são curvados em direção a um ponto focal, aumentando consideravelmente a energia na região central, logo na saída da lente, conforme foi apresentado na Figura 27a.

6. DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO QUE INCLUA OS PADRÕES INTERNOS COMO PARÂMETROS DE DESIGN

A exploração da nova técnica de variação dielétrica e a caracterização dos materiais utilizados demonstrou que os filamentos de ABSg possuem alta capacidade de perda dielétrica. Existem diversos dispositivos de micro-ondas que podem se beneficiar desta característica. O principal desafio no desenvolvimento destes dispositivos é a melhoria do seu desempenho frente ao uso de novas tecnologias ou novas abordagens de *design*. Para identificar dispositivos que poderiam se beneficiar desta característica de perda dielétrica dos filamentos de ABSg, foi feita uma revisão na literatura. Dos dispositivos encontrados na literatura, os absorvedores têm se destacado exatamente pela exploração de materiais que possuem alta perda dielétrica e pela exploração de formas geométricas para melhorar seu desempenho.

Os absorvedores são dispositivos construídos com o propósito de absorver ondas eletromagnéticas. A absorção visa reduzir as emissões eletromagnéticas de dispositivos para o ambiente externo ou de bloquear sua recepção, com a intenção de reduzir a interferência de ondas eletromagnéticas externas a um circuito interno ou ainda para evitar que as ondas eletromagnéticas produzidas por algum circuito sejam refletidas de volta a fonte.

Muitos estudos controlados de dispositivos RF são feitos dentro de câmaras anecoicas, que possuem paredes revestidas de material absorvedor, impedindo o retorno de sinal eletromagnético emitido pelo equipamento que chega até as paredes e bloqueando a entrada de sinal eletromagnético externo a câmara.

Com a proposta de se melhorar o desempenho de absorvedores, foi conduzido um trabalho para identificar seu funcionamento e como a geometria é utilizada na melhoria de sua absorvidade. Ao se identificar que a maioria dos absorvedores analisados são sólidos, verificou-se a possibilidade de se utilizar geometrias internas. Foram pesquisados como os padrões internos dos absorvedores podem promover a melhoria de suas propriedades absorvedoras, reduzindo custos e material em sua produção.

6.1 Técnicas e materiais usados para produção de absorvedores

Com uma infinidade de dispositivos eletrônicos emitindo radiação eletromagnética, é comum que diversos lugares apresentem altas densidades de

radiação eletromagnética, que pode interferir no funcionamento de diversos dispositivos, como em dispositivos críticos de manutenção da vida ou de sinalização e controle de aeronaves. Dispositivos de isolamento eletromagnético, como os absorvedores, são frequentemente usados para atenuar a radiação eletromagnética existente (CHEN *et al.*, 2019). Devido às suas características de absorção e baixa reflexão, muitos absorvedores também podem ser usados como dispositivos de camuflagem ou para eliminar ondas eletromagnéticas indesejadas (KIM; HAN; HAHN, 2017; YAO *et al.*, 2023). O trabalho desenvolvido por Kim e seus colaboradores (KIM; HAN; HAHN, 2017) descreve um tipo de absorvedor que é capaz de impedir a reflexão de ondas eletromagnéticas na faixa do infravermelho, para temperaturas desde ambiente a até 500 °C. O trabalho finaliza descrevendo que os absorvedores têm eficiência de 90% na absorção das ondas de infravermelho, o que torna qualquer objeto revestido com o absorvedor indetectável por sensores convencionais de infravermelho. A interação dos campos eletromagnéticos com a estrutura molecular do material absorvedor converte parte da radiação incidente em energia térmica. Uma outra parte pode ser desviada na forma de reflexão, indo para um caminho oposto à sua trajetória inicial, cumprindo uma função de barreira eletromagnética.

A eficiência de um absorvedor é medida pela sua capacidade de absorção ou absorvidade, que é a capacidade de consumir ou reter a passagem da onda eletromagnética, impedindo sua trajetória através de diversos processos, que incluem fenômenos físicos de absorção, difração, refração e reflexão. Para verificar a absorvidade de um absorvedor é necessário o uso de equipamentos que sejam capazes de enviar uma onda eletromagnética ao absorvedor e medir potência do sinal que é refletida ou que atravessa o absorvedor. Isto pode ser obtido de algumas formas. O mais comum é o uso de antenas conectadas a um equipamento tipo VNA. Pode-se montar uma configuração com apenas uma antena e colocar o absorvedor sobre uma base refletora e analisar o nível do refletido de volta a antena emissora (parâmetro S_{11}). Também é possível montar um *setup* com duas antenas e analisar a reflexão e transmissão (parâmetro S_{11} e S_{21}).

Em diversos estudos analisados, um absorvedor é considerado funcional quando a potência transmitida e/ou refletida é inferior a -10 dB, correspondendo a uma absorvidade de 90% ou mais. (LLESHI *et al.*, 2021; PETROFF *et al.*, 2019; PEYMANFAR; MIRKHAN, 2022).

6.1.1 Tipos de materiais utilizados na produção de absorvedores

Em diversos estudos envolvendo absorvedores, é comum a utilização de materiais que apresentem valores consideravelmente altos de perda dielétrica, como materiais contendo carbono ou fibras de carbono (CHEN *et al.*, 2021; NEO; VARADAN, 2004). Investigações anteriores já haviam confirmado a capacidade de fibras de carbono em absorver grande parte da energia das ondas eletromagnéticas na faixa do micro-ondas, sendo um material muito útil na construção desse tipo de dispositivo (GUNWANT; VEDRTNAM, 2021). Nos absorvedores produzidos com metamateriais dielétricos (DMM), os padrões estruturais desempenham um papel crucial nas características do absorvedor, pois podem melhorar uma propriedade existente no material ou ainda exibir uma nova propriedade baseada na interação do material com a geometria da estrutura. Estruturas do tipo colmeia com intercalação de materiais resistivos e estruturas feitas de ácido polilático (PLA) mostraram-se eficazes na absorção de mais de 90% da radiação incidente, mesmo tendo a maioria do material do absorvedor feito com PLA, que possui uma baixa capacidade de absorção nas faixas de RF e micro-ondas (JIANG *et al.*, 2018). Isto demonstra que a combinação de materiais e estruturas é extremamente importante na produção de absorvedores.

Outro trabalho, desenvolvido por Chen *et al.* (CHEN *et al.*, 2019), descreve como o grafeno pode ser utilizado na construção de absorvedores para bloquear a reflexão de ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas e frequências na faixa dos terahertz, com aplicações na área de defesa militar.

Muitas dessas estruturas possuem montagens complexas tendo intercalação de dois ou mais materiais através de diversas estruturas de repetição periódicas (DING *et al.*, 2012). Esse problema pode ser minimizado com o uso de tecnologias de manufatura aditiva, como processos de impressão 3D. Vários estudos já apresentaram absorvedores altamente eficientes produzidos por técnicas de impressão 3D utilizando filamentos à base de carbono. Alguns estudos apresentam estruturas bastante complexas, como labirintos contendo diversos tipos de geometrias (PETROFF *et al.*, 2019; REN; YIN, 2018). Impressoras 3D podem ser utilizadas em processos de intercalação de materiais utilizando dois ou mais bicos de extrusão. Como cada bico pode receber um filamento de material diferente, as propriedades dos materiais podem ser combinadas em forma de camadas ou fileiras,

produzindo objetos com propriedades distintas dos materiais utilizados. Com isso, é possível produzir estruturas mais complexas, incluindo formas geométricas e intercalação com mais materiais com menos etapas em seu processo de produção (LLESHI *et al.*, 2021).

6.1.2 Influência da geometria e formas de medir sua eficiência

Diversos trabalhos mostraram que a geometria é um parâmetro importante e impacta nos resultados obtidos pelo absorvedor (GUO *et al.*, 2017; JIANG *et al.*, 2018; LLESHI *et al.*, 2021; PETROFF *et al.*, 2019). A geometria faz com que a onda eletromagnética passe por interações adicionais com o material do absorvedor, fazendo com que a onda seja refletida internamente no absorvedor várias vezes, aumentando a absorção produzida pelo material. Jiang e seus colaboradores publicaram em 2018 um trabalho utilizando técnicas de manufaturas aditivas, com uso de impressoras 3D, na produção de absorvedores (JIANG *et al.*, 2018). Aquele trabalho descreve uma equação para o cálculo da absorção, que é uma variação da equação de conservação de energia (equação 13), em que A é a capacidade de absorção do material ou absortividade, R quantidade de onda refletida e T é quantidade da onda transmitida.

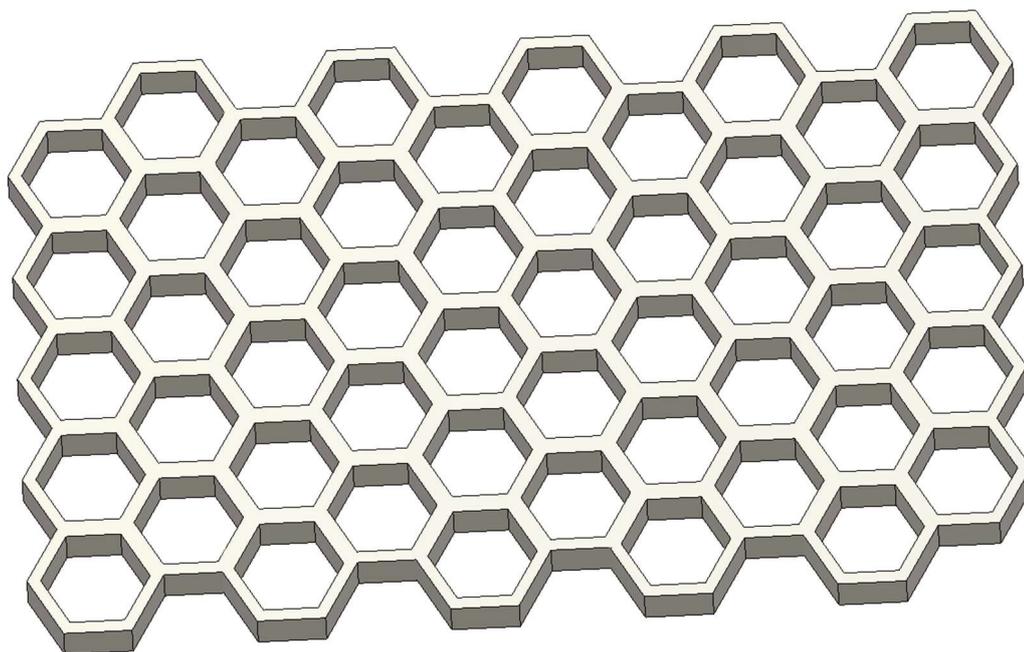
$$A=1-R-T \quad (13)$$

Jiang *et al.* (2018) detalham que a absortividade pode ser calculada em função dos parâmetros S_{11} e S_{21} para uma determinada frequência. Os valores para S_{11} e S_{21} devem estar em seu formato linear e não na escala logarítmica. Neste caso, pode-se assumir que $R=|S_{11}|^2$ e que $T=|S_{21}|^2$, obtendo a equação 14.

$$A=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2 \quad (14)$$

Aquela investigação utilizou uma placa metálica na parte inferior do absorvedor, assim, a onda eletromagnética que consegue passar pelo absorvedor é refletida de volta, sofrendo nova absorção. Com isso, foi possível calcular a absortividade do material em função dos parâmetros S_{11} e S_{21} .

Figura 29 - Esquema da absorvedor proposto por Jiang *et al.* (2018).



Fonte: Próprio autor

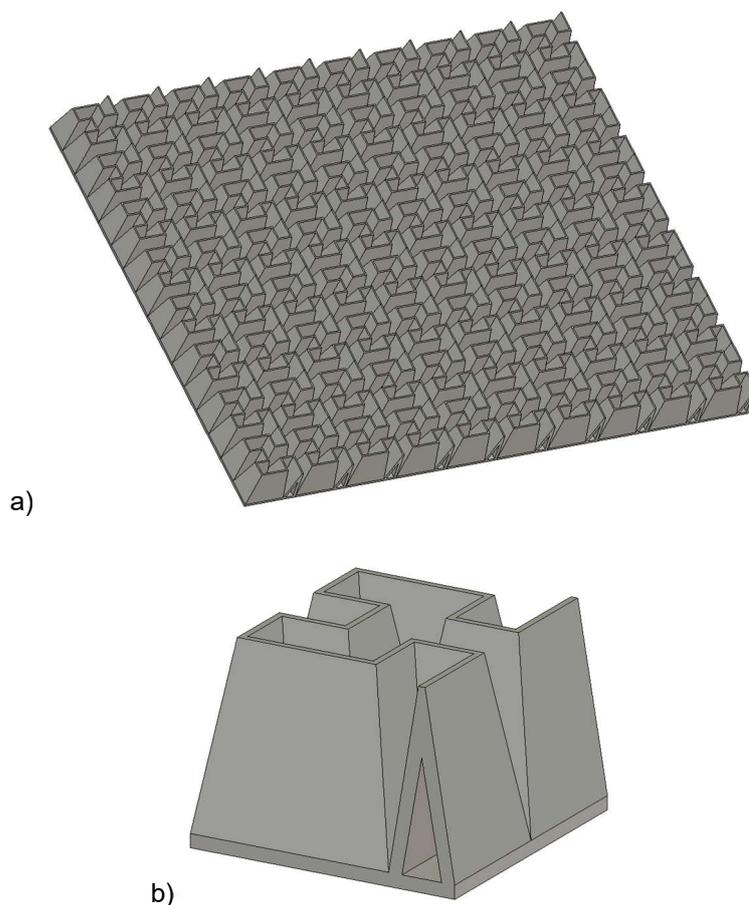
O absorvedor produzido por Jiang *et al.* (2018) segue o formato hexagonal, conforme esquema mostrado na Figura 29. Nas paredes internas dos hexágonos foram colados filmes resistivos na espessura de 10 μm . Para analisar o funcionamento do absorvedor, foi montado um *setup* onde o absorvedor estava sob uma placa metálica. Com o auxílio de uma antena e um VNA, o parâmetro S_{11} do sistema foi medido nas frequências entre 2 e 24 GHz. Os resultados mostraram que a reflexão ficou abaixo de -10 dB na maioria das frequências analisadas, sendo que, entre 12 e 22 GHz, ficaram abaixo de -15 dB. Também foram feitas medições com o ângulo de incidência variando em até 70°. O trabalho conclui detalhando que a estrutura foi capaz de absorver mais de 90% da onda eletromagnética incidente.

Petroff *et al.* (2019) exploraram como a geometria e o uso de um filamento de polímero HIPS (*High Impact PolyStyrene* ou Poliestireno de alto impacto) com carga de carbono e como isso pode ser utilizado na impressão de um absorvedor que segue o padrão da curva de Hilbert (Figura 30a) (PETROFF *et al.*, 2019). A Figura 30b mostra uma ampliação da célula de repetição utilizada para produzir o absorvedor.

Os resultados mostraram que o absorvedor foi eficiente em absorver as ondas eletromagnéticas em uma faixa de frequência bem ampla, de 63 a 215 GHz. Na maioria

das frequências, o sinal refletido ficou entre -25 e -33 dB, que é menor que 0,05% de retorno da onda eletromagnética incidente, mostrando que o absorvedor é eficiente em bloquear a maioria do retorno do sinal emitido de volta para a sua fonte.

Figura 30 - a) Representação esquematizada do absorvedor utilizando a curva de Hilbert desenvolvida por Petroff *et al.* b). Célula de repetição que foi utilizada na construção do absorvedor.

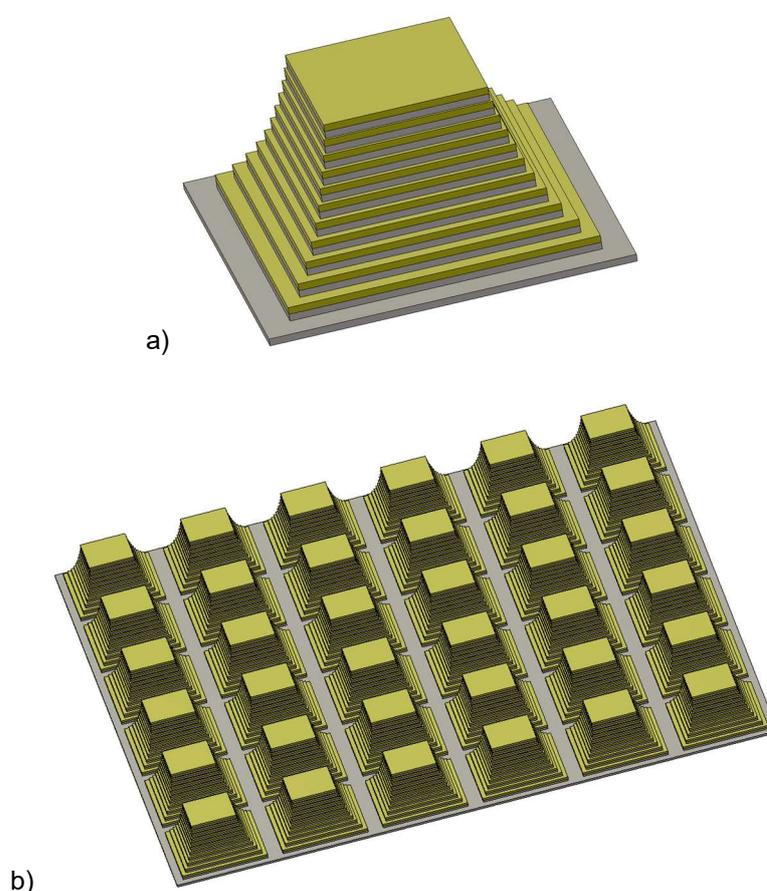


Fonte: Próprio autor

Outro trabalho, desenvolvido por Lleshi *et al.* (LLESHI *et al.*, 2019, 2021), explorou o uso de uma impressora 3D com dois bicos de impressão no desenvolvimento de um absorvedor que foi construído alternando camadas horizontais com material de um filamento baseado em PLA condutivo e outra camada com material de filamento ABS convencional. As arestas verticais das pirâmides foram modeladas com o auxílio de uma função hiperbólica. A Figura 31a apresenta a célula unitária do absorvedor e a Figura 31b apresenta uma representação esquematizada do absorvedor desenvolvido naquela investigação.

As medidas de RF indicaram que os absorvedores são eficientes na região de frequências entre 8.3 e 17.8 GHz. Apesar de os resultados variarem em função do ângulo de incidência e da polarização vertical e horizontal, na maioria dos casos, a absorção passa de 90%, chegando a mais de 95% em algumas frequências e ângulos de incidência específicos, demonstrando que a técnica produz absorvedores com bons resultados de absorção.

Figura 31 - (a) Célula de repetição do absorvedor proposto por Lleshi *et al.* As camadas cinzas são de PLA convencional e as camadas mais claras são de PLA condutivo. (b) Representação esquematizada do absorvedor proposto por Lleshi *et al.* em seu trabalho.



Fonte: Próprio autor

Os resultados do trabalho incluíram uma análise por raios-X para verificar a adesão entre as camadas. A diferença de 40° C na temperatura de fusão entre o PLA e ABS utilizados fez com que o PLA ficasse parcialmente fluido após a sua deposição, durante o processo de impressão, produzindo camadas que acabavam escoando parcialmente pelas laterais da pirâmide (Figura 32). Apesar de parte do material das

camadas escoarem e fiquem deformadas, com a análise por raios-X foi possível afirmar que não houve comprometimento interno considerável na estrutura da pirâmide e não houve acúmulos consideráveis de *gaps* de ar (LLESHI *et al.*, 2019, 2021).

Figura 32 - Foto do protótipo produzido por Lleshi *et al.* em seu trabalho sobre absorvedores com materiais intercalados.



Fonte: Lleshi *et al.*, 2019

6.2 Geometrias como parâmetros de *design*

Durante o processo de revisão da literatura, verificou-se que a maioria dos absorvedores baseados em materiais com alta perda dielétrica utiliza algum tipo de geometria que é analisada na pesquisa. Essa geometria potencializa o efeito da absorção existente no material utilizado. A geometria normalmente explora os fenômenos físicos de difração, refração e reflexão. Na difração, quando uma onda EM passa por uma fenda com comprimento de onda (λ) próximo ao seu comprimento, ela sofre espalhamento (JOSEPH; TYSON; BURNSIDE, 1994). Nos fenômenos de refração, a onda EM ao atravessar de um meio para outro pode sofrer aumento ou redução do seu ângulo na troca de meios, dependendo do índice de refração do material, que depende diretamente da constante dielétrica dos materiais envolvidos. Isso é conhecido como lei de Snell para refração (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2013). Nos processos envolvendo dois meios com índices de refração diferentes, além da refração, pode ocorrer o fenômeno de reflexão. Isto ocorre quando parte da energia da onda EM é refletida de volta ao meio de origem.

Ao sofrer difração, refração e reflexão, a onda eletromagnética é espalhada e percorre um caminho bem mais longo dentro do absorvedor, o que não ocorreria se o absorvedor fosse 100% plano. Ao ser construído com material de alta perda dielétrica,

quanto maior o caminho percorrido pela onda EM, maior será a sua perda de energia para o meio, sofrendo absorção.

A maioria dos absorvedores analisados utiliza algum tipo de estrutura de repetição, que normalmente é sólida. Essa estrutura de repetição produz o efeito de difração ao produzir fendas entre as paredes das estruturas, após o efeito de difração ocorrer, diversos outros fenômenos de refração e reflexão costumam ocorrer. A única exceção identificada foi no trabalho de Petroff *et al.* (PETROFF *et al.*, 2019) onde foi explorada uma estrutura interna oca semelhante à estrutura externa aplicada, mas sem verificar se a estrutura interna efetivamente melhorava absorvidade em relação a mesma estrutura sólida.

6.3 Modelagem conceitual

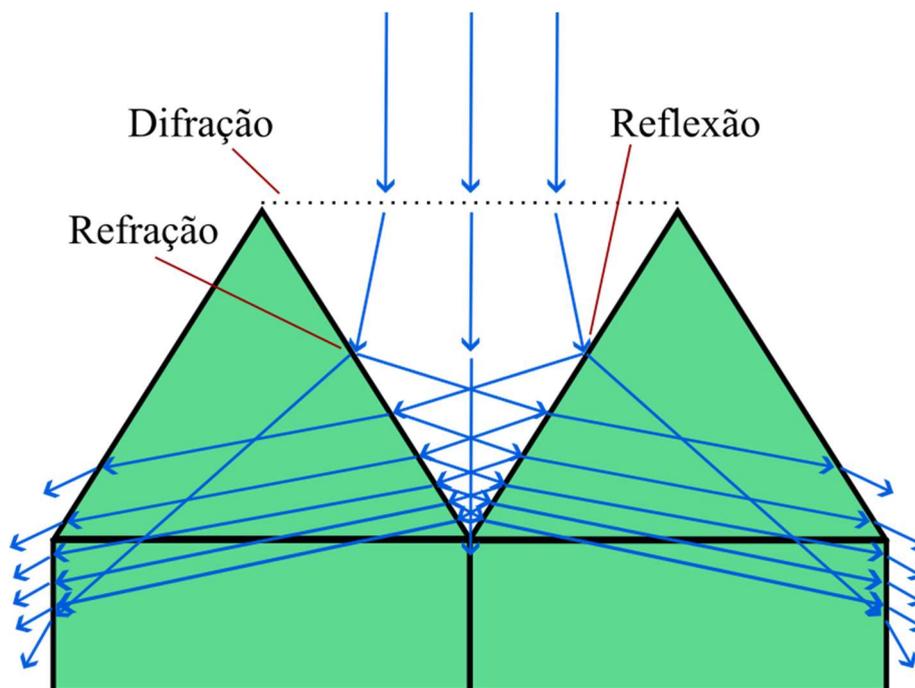
Em diversas pesquisas conduzidas com absorvedores, os absorvedores do tipo piramidal recebem atenção especial, sendo utilizados em formato sólido (JUNG *et al.*, 2021; YENG SENG *et al.*, 2020). Esse tipo de estrutura também é utilizado em absorvedores comerciais, trazendo excelente resultados. De fato, as câmaras anecoicas normalmente são construídas com absorvedores piramidais devido a sua alta eficiência em absorver a onda eletromagnética incidente. A maioria destes absorvedores são construídos a partir de técnicas tradicionais de moldagem ou de outras técnicas como manufatura subtrativas. A maioria destas técnicas empregadas favorecem a exploração de geometrias externas, como objetos com interior sólido.

Como as pirâmides possuem faces inclinadas, duas faces de pirâmides adjacentes podem se comportar como fendas para diferentes comprimentos de onda durante a passagem das ondas eletromagnéticas, favorecendo a difração em uma ampla faixa de frequência. Com faces inclinadas, os fenômenos de refração ocorrem direcionando a onda para o interior da pirâmide. A reflexão desviará parte da onda eletromagnética para a pirâmide vizinha, onde o processo de refração e reflexão ocorrerá novamente. Uma pirâmide sólida apresentando as interações citadas é exibida na Figura 33.

Com a Figura 33 representando a interação entre dois fenômenos que podem ocorrer em um absorvedor piramidal, verifica-se visualmente que a distância percorrida pela onda eletromagnética é o mecanismo chave para funcionamento do absorvedor, já que quanto maior for o caminho percorrido dentro do material, maior

será a absorção da onda EM. Se novos fenômenos de difração, refração e reflexão forem obtidas com estruturas internas, maior será o espalhamento da onda EM dentro do material e, consecutivamente, maior será a absorção.

Figura 33 - Possíveis interações de difração, refração e reflexão em pirâmides sólidas



Fonte: Próprio autor

Já foi confirmado que a absorvidade de um absorvedor sólido depende essencialmente da quantidade de material utilizado no absorvedor e de sua geometria externa. Encontrar um padrão interno que permita a utilização de menor quantidade de material na sua construção e que mantenha as propriedades absorvedoras é um desafio que permitiria explorar fenômenos físicos adicionais na parte interna do absorvedor e reduzir custos de fabricação.

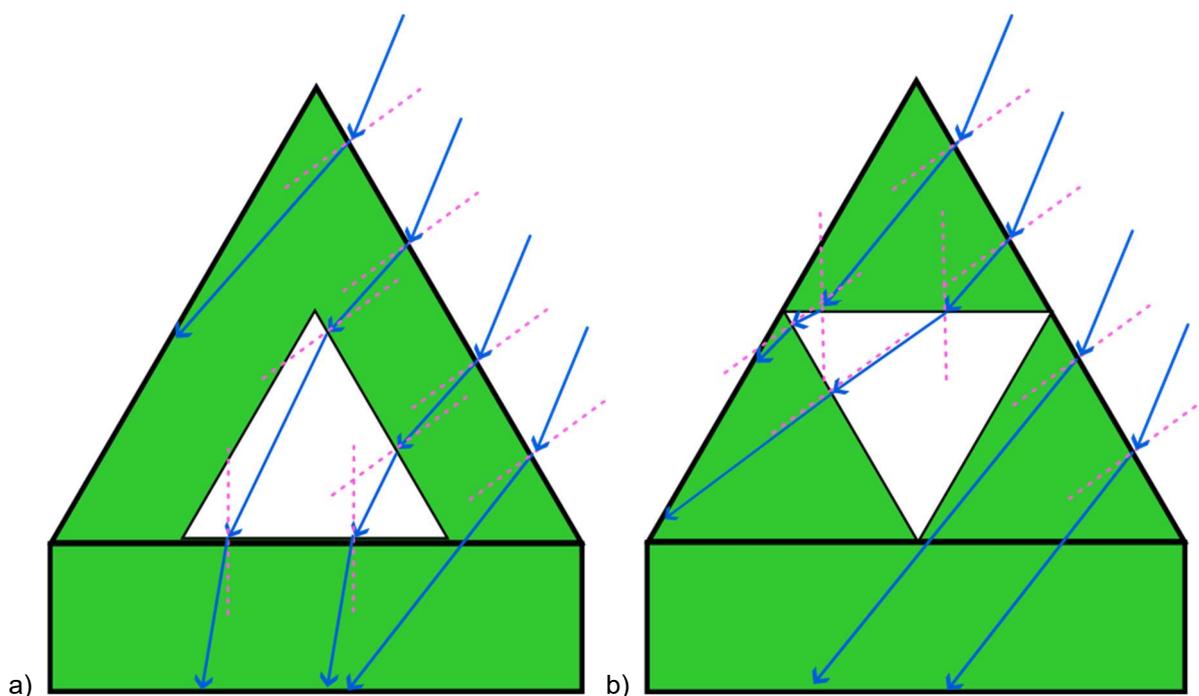
Como as estruturas externas favorecem a ocorrência de fenômenos de difração, refração e reflexão, espera-se que as estruturas internas forneçam os mesmos fenômenos internamente. O fenômeno de refração depende de índices de refração diferentes entre os materiais da interface e quanto maior for a diferença entre os valores de n dos dois materiais, maior será a alteração no ângulo de saída da onda eletromagnética na troca de interface. Neste caso, a maior diferença entre valores de n ocorreria entre interfaces ar/ABSg, sendo que estruturas ocas internas poderiam

fornecer difrações, refrações e reflexões adicionais, espalhando ainda mais a onda eletromagnética, que poderá ser consumida pelo material absorvedor.

Conforme apresentado na Figura 33, a estrutura piramidal tem seu valor por possuir faces inclinadas. Estas faces inclinadas favorecem os fenômenos citados anteriormente. A utilização de estruturas internas ocas em formatos semelhantes também poderia produzir os mesmos efeitos. Em testes preliminares executados, estruturas internas com faces tendo a mesma orientação de inclinação das faces externas apresentaram resultados piores que sua versão sólida, permitindo afirmar que os padrões necessitam de orientação e periodicidade específica para serem eficientes.

Como o fenômeno de refração depende basicamente dos índices de refração dos dois meios na interface e do ângulo de incidência, foi feita uma análise simplificada de como uma face inclinada interna afetaria o caminho percorrido pela onda EM com faces com a mesma inclinação da face externa (Figura 34a) e com faces internas com inclinação invertida em relação às faces externas (Figura 34b).

Figura 34 - Possíveis caminhos percorridos internamente pela onda EM, considerando-se apenas os fenômenos de refração. (a) Parte oca com mesma orientação da pirâmide. (b) Parte oca com orientação invertida em relação a pirâmide.

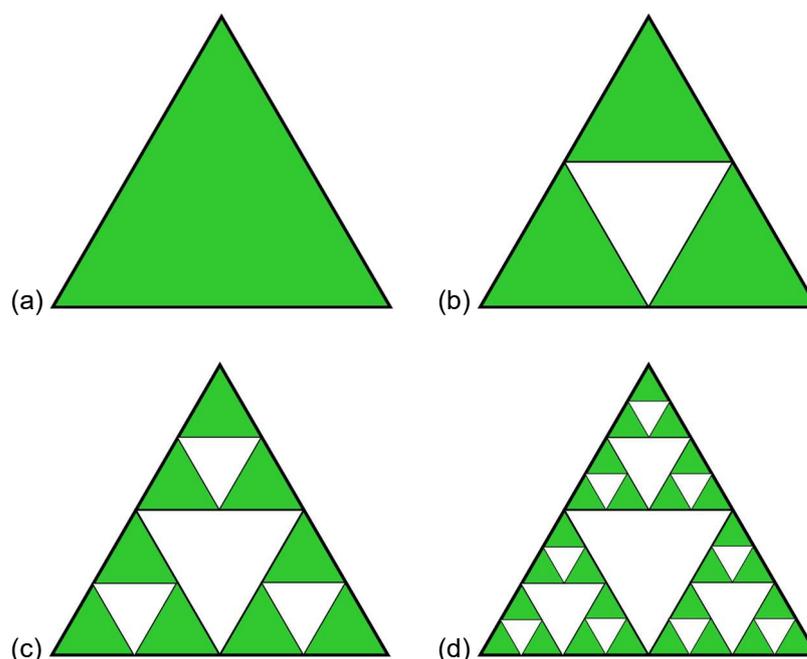


Fonte: Próprio autor

Analisando a Figura 34 e considerando apenas o fenômeno de refração, verifica-se que quando a parte oca tem faces com orientação invertida em relação as faces externas (Figura 34b), as ondas EM incidentes atravessam uma porção maior do material absorvedor, sofrendo maior absorção. Isto indica que a configuração de faces internas invertidas fornece uma melhor solução para o *design* dos padrões internos.

Revisando a literatura sobre estruturas triangulares, verifica-se que o triângulo de Sierpiński (FALCONER; LAMMERING, 1998) apresenta uma estrutura formada por um fractal que permite formar triângulos internos em um processo iterativo. Esses triângulos internos possuem faces invertidas em relação ao triângulo principal, semelhante ao que ocorre na Figura 34b. Os triângulos de Sierpiński são um tipo de fractal autossimilar, por possuir repetições de si mesmo em seu interior em versões menores.

Figura 35 - Triângulo de Sierpiński para $n=0$ (a), $n=1$ (b), $n=2$ (c) e $n=3$ (d). A cor verde representa a parte preenchida e a branca representam os triângulos menores que são inseridos de forma a remover parte de seu interior do triângulo principal.

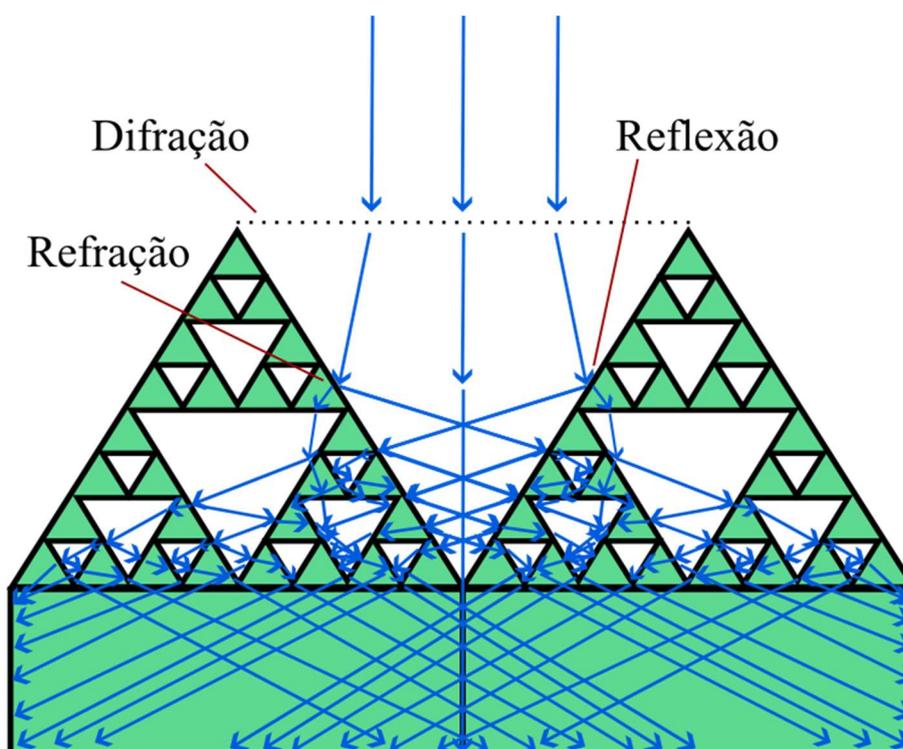


Fonte: Próprio autor

Este tipo de fractal pode ser construído através de um processo iterativo, com o uso de triângulos equiláteros. A iteração $n=0$ (Figura 35a) é o triângulo equilátero inicial e a cada iteração (que também pode ser chamada de ordem), triângulos

invertidos, com dimensões reduzidas em 50% em relação a ordem anterior são incluídos nas partes não preenchidas no triângulo inicial. A Figura 35b mostra o preenchimento de um triângulo de primeira ordem. Na Figura 35c, existe uma representação do triângulo de Sierpiński de segunda ordem e na Figura 35d uma representação para a terceira ordem. As iterações podem tender ao infinito, com triângulos cada vez menores.

Figura 36 - Possíveis interações de difração, refração e reflexão em pirâmides com padrões internos com intercalação de ar e material



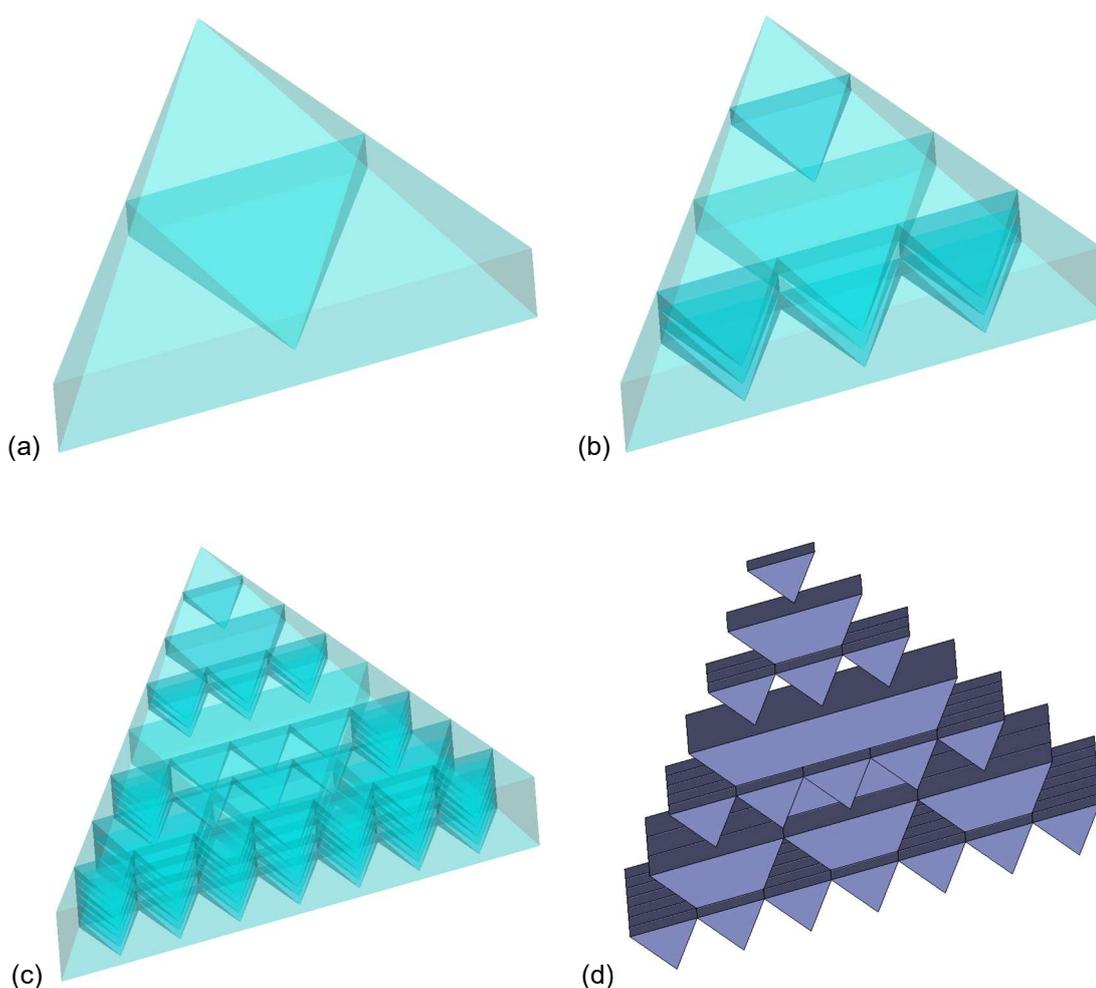
Fonte: Próprio autor

Nos absorvedores piramidais, uma versão 3D do triângulo de Sierpiński produziria pirâmides internas ocas invertidas, com faces inclinadas opostas as faces externas. Como apresentado anteriormente, fenômenos adicionais de difrações, refrações e reflexões semelhantes ao que ocorrem na parte externa são esperados que ocorram na parte interna.

Uma ilustração das possíveis interações adicionais é apresentada na Figura 36. Nesta nova versão, a base tem função determinante na capacidade do absorvedor, já que a maioria das ondas EM espalhadas seriam direcionadas diretamente para ele. O fato de a pirâmide possuir muitas estruturas ocas

internamente também aumenta os efeitos de refração e reflexão. Com muitas novas ondas sendo produzidas pelas divisões ocorridas nas reflexões internas e com várias delas sendo direcionadas para base, a absorção continua a ocorrer, mesmo com uma menor quantidade de material no interior da pirâmide.

Figura 37 - Representação esquematizada de uma versão 3D de uma pirâmide inspirada no fractal do triângulo de Sierpiński para $n = 1$ (a), $n = 2$ (b), $n = 3$ (c) a quantidade de material que é removido para $n = 3$.



Fonte: Próprio autor

Uma representação esquematizada 3D de uma pirâmide inspirada nos triângulos de Sierpiński é apresentada na Figura 37 para $n = 1$ (a), $n = 2$ (b) e $n = 3$ (c). Apesar da Figura 37c aparentar ter uma grande quantidade de material removido, vale lembrar que para $n = 1$, temos 1 pirâmide com volume de 12,5% da pirâmide original, para $n = 2$, são 9 pirâmides, cada uma com volume de 1,56% da pirâmide original e para $n = 3$, são 65 pirâmides, cada uma com volume de 0,2% da pirâmide

original. O volume total removido da pirâmide principal para $n = 3$ é de 39,26%. Se fosse o contrário, onde inicia-se com uma pirâmide vazia e cada iteração acrescenta uma versão menor da pirâmide cheia, teríamos apenas 39,26% de material na pirâmide, o que pelos testes iniciais inviabilizava seu uso como absorvedor.

6.4 Modelagem eletromagnética e simulação

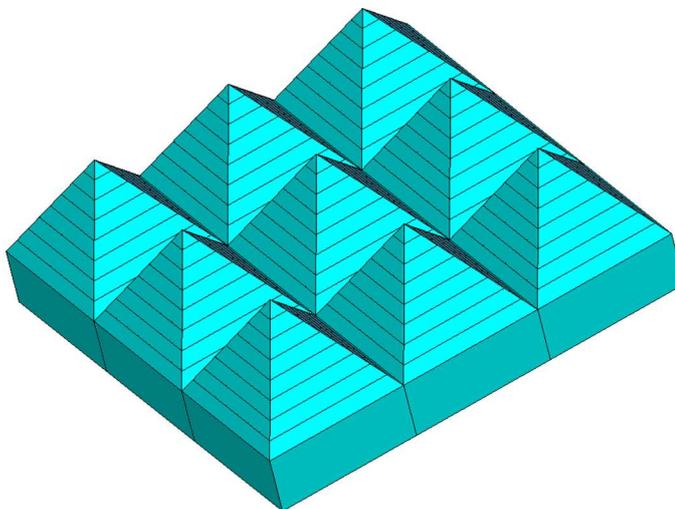
A modelagem foi executada com o auxílio do *software* de simulação eletromagnética CST Studio 3D EM (CST STUDIO SUITE, 2020; REN; YIN, 2018). Para as simulações, foi modelado um conjunto de 9 pirâmides, dispostas em uma supercélula 3×3 (

Figura 38). Essa disposição permite simular adequadamente o espalhamento (difração), que depende das fendas formadas pelas distâncias entre pontos em faces adjacentes das pirâmides, e dos efeitos de reflexão entre faces.

Outros efeitos, como difração, interferência construtiva e destrutiva, que são produzidos pela refração e reflexão de ondas eletromagnéticas, só poderiam ser simulados se as pirâmides vizinhas estivessem presentes. Essa supercélula garante que o mesmo número de faces de pirâmides adjacentes esteja presente, tomando a pirâmide central como base. Isto evita distorções, já que em qualquer direção, o mesmo número de faces está presente. Cada pirâmide possui uma base sólida que é utilizada em absorvedores piramidais fornecendo material adicional que favorece a absorção de ondas eletromagnéticas espalhadas pelos fenômenos de difração, refração e reflexão. Nas simulações, a porta 1 (fonte de sinal) foi posicionada a 1 m de distância do absorvedor e uma placa de alumínio de 3 mm foi modelada logo abaixo da base do absorvedor. Para a “*bounding box*”, foi definido para x_{min} e x_{max} que $E_t = 0$ (condutor elétrico perfeito) e para y_{min} e y_{max} , foi definido que $H_t = 0$ (condutor magnético perfeito) (PETROFF *et al.*, 2019).

Para o material utilizado na simulação, considerou-se a utilização de materiais com alta perda dielétrica, como filamentos com alta concentração de carbono em sua composição. Este tipo de material possui alta perda dielétrica, absorvendo energia eletromagnética, sendo muito útil na produção de absorvedores (CHEN *et al.*, 2019; GUNWANT; VEDRTNAM, 2021; NEO; VARADAN, 2004). Foi utilizado como material o ABSg, que já foi utilizado neste trabalho para a produção da lente dielétrica e é basicamente o ABS ESD, contendo alta concentração de carbono, com alta constante dielétrica e alta tangente de perda (KALAŠ *et al.*, 2021).

Figura 38 - Versão esquematizada do absorvedor simulado no CST de 3ª ordem.



Fonte: Próprio autor

A caracterização já foi realizada neste trabalho utilizando uma microlinha com um ressonador em “T” (CATARINUCCI *et al.*, 2017), demonstrando que o filamento ABSg empregado tem uma constante dielétrica de 6,5 (ϵ_r) e uma tangente de perda de 0,361 ($\tan \delta$) em 2,45 GHz (DE OLIVEIRA NETO *et al.*, 2023b).

As simulações dos absorvedores foram realizadas entre 6 e 16 GHz. Esta faixa de frequência foi escolhida em função das antenas do tipo Vivaldi Palm Tree disponíveis para a medidas dos parâmetros de $|S_{11}|$ e $|S_{21}|$, que operam nestas frequências (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021). Foram realizadas várias simulações para determinar os melhores valores para aresta das pirâmides equiláteras (e) e para a altura da base (h).

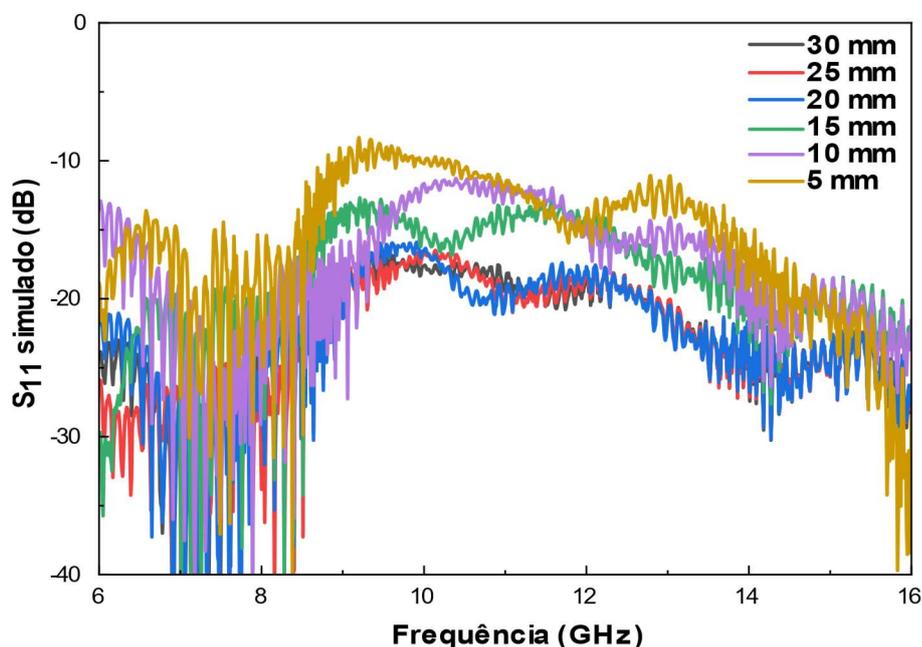
Para cada simulação, a capacidade de absorção em função dos parâmetros S foi calculada seguindo as orientações do trabalho desenvolvido por Jiang *et al.* (JIANG *et al.*, 2018). A placa de metal modelada logo abaixo do absorvedor faz com que a onda eletromagnética seja refletida de volta para a fonte e o parâmetro de transmissão $|S_{21}|$ não é utilizado. Com isso, a capacidade de absorção pode ser calculada apenas em função do parâmetro $|S_{11}|$.

Como descrito anteriormente, em absorvedores com materiais de alta perda dielétrica, quanto maior for o caminho interno percorrido pela onda, maior será sua perda de energia, então é interessante que a onda percorra o maior caminho possível

e isto pode ser feito utilizando-se dos fenômenos de difração, refração e reflexão. No caso dos absorvedores piramidais, as fendas formadas pelos picos das pirâmides equiláteras adjacentes, que possuem a mesma distância de suas áreas (e) determinam qual é o comprimento de onda se inicia a difração, representada na Figura 36.

Com os modelos conceituais definidos, o simulador CST foi utilizado para simular diversos absorvedores piramidais equiláteros sólidos. Inicialmente foram executadas algumas simulações para se determinar o melhor valor de altura para a base. Para isso, foram realizadas diversas simulações para um absorvedor com o fractal de Sierpiński $n = 3$ com pirâmide de aresta de 80 mm para várias alturas de base. Os resultados apresentando o parâmetro S_{11} simulado em função da frequência são mostrados na Figura 39.

Figura 39 - Gráfico do parâmetro $|S_{11}|$ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para absorvedores piramidais equiláteros com fractal $n = 3$ e aresta 80 mm para várias medidas de altura da base (h) e onda EM incidente de 0° em relação a normal.

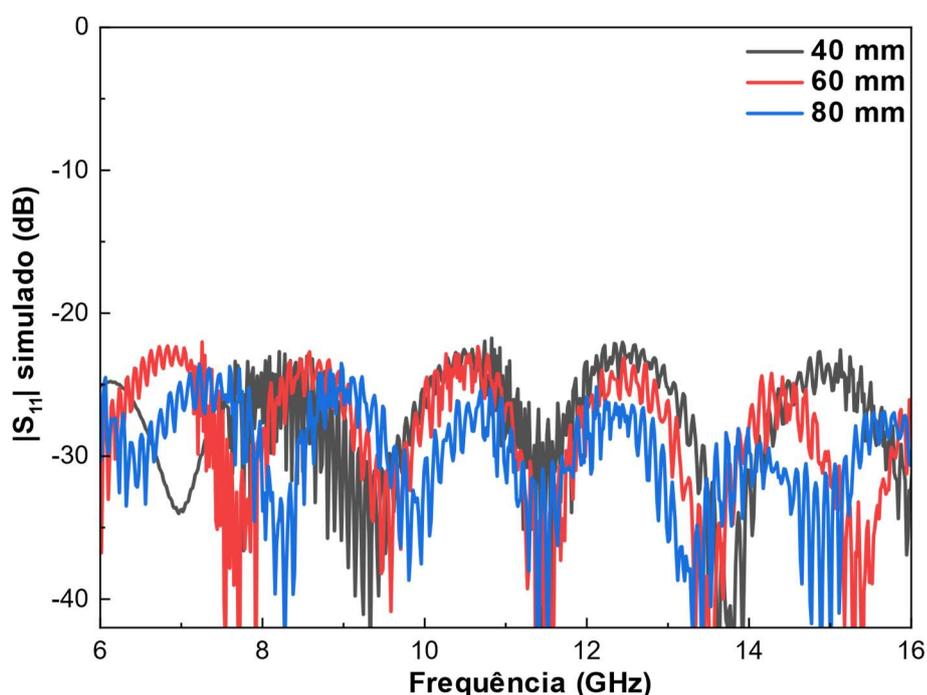


Fonte: Próprio autor

O absorvedor fractal simulado com altura da base em 5 mm apresentou os piores resultados com algumas frequências com respostas ligeiramente acima de -10 dB. Já os absorvedores simulados com altura da base em 10 e 15 mm apresentaram resultados melhores, com a maioria das frequências tendo reflexões abaixo de -10 dB,

indicando que 90% ou mais da onda incidente foi absorvida. A partir de 20 mm de altura de base, as respostas são muito próximas ou abaixo de -20 dB, o que significa que absorvedores com esta altura de base foram eficazes em absorver 99% ou mais da onda EM incidente. Como os absorvedores com altura de 25 e 30 mm possuem respostas muito próximas ao absorvedor com altura de 20 mm, optou-se por utilizar essa medida de altura para as próximas simulações.

Figura 40 - Gráfico do parâmetro $|S_{11}|$ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para absorvedores piramidais equiláteros sólidos com aresta (e) de 40, 60 e 80 mm com base (h) de 20 mm e onda EM incidente de 0° em relação a normal.



Fonte: Próprio autor

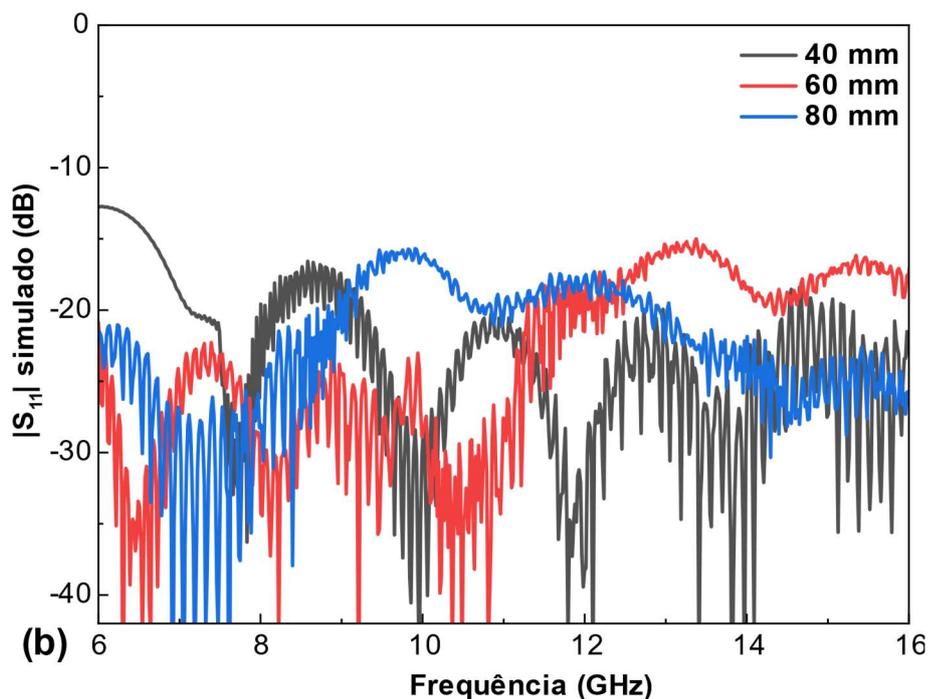
A Figura 40 apresenta o gráfico do parâmetro $|S_{11}|$ simulado em função da frequência para vários absorvedores piramidais equiláteros sólidos com aresta (e) para pirâmides sólidas. Os resultados simulados permitem confirmar que os absorvedores que utilizam pirâmides equiláteras sólidas possuem boa capacidade de absorção em todas as frequências analisadas, com resultados abaixo de -20 dB, sendo efetivos em bloquear mais de 99% da radiação incidente. Em várias frequências, os valores ficam abaixo de -30 dB apresentando mais de 99,9% de absorção. Os resultados muito próximos entre os absorvedores sólidos com aresta de 40, 60 ou 80 mm demonstram que a única variação significativa ocorre na região onde

se inicia a difração, que pode ser visualizada na curva da aresta de 40 mm, que ocorre a partir de 7,5 GHz.

Também é possível verificar na Figura 40 a existência de outro fenômeno físico que ocorre após a frequência onde se inicia a difração, que é o aparecimento de interferências construtivas e destrutivas das ondas EM, que podem ser identificadas através dos vários picos altos e baixos.

A Figura 41 apresenta o parâmetro $|S_{11}|$ simulado para vários absorvedores com comprimento de aresta (e) com pirâmides equiláteras utilizando o fractal de Sierpiński com $n = 3$. Para as arestas (e) maiores (60 e 80 mm), a presença do fractal produziu absorvedores com menor capacidade de absorção com diferença de até 10 dB nas frequências mais altas, o que a princípio é um resultado ruim, mas, quando comparado ao resultado da versão sólida, representa uma diferença em torno de 5% da sua capacidade de absorção.

Figura 41 - Gráfico do parâmetro $|S_{11}|$ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para absorvedores piramidais equiláteros utilizando o fractal de Sierpiński com $n = 3$ com aresta (e) de 40, 60 e 80 com base (h) de 20 mm e onda EM incidente de 0° em relação a normal.



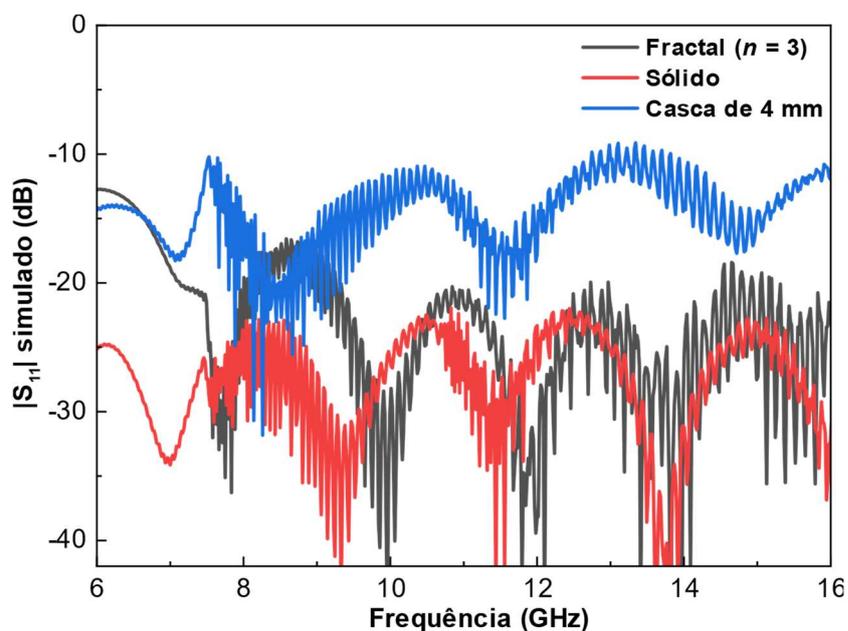
Fonte: Próprio autor

Mesmo com desempenho menor que dos absorvedores piramidais sólidos, esses valores indicam que os absorvedores com estruturas fractais Sierpiński no

interior das pirâmides são eficazes em absorver a onda eletromagnética incidente de 0° em relação à normal em uma ampla faixa de frequência, com resultados superiores a mais de 90% de absortividade, comparável a diversos absorvedores desenvolvidos em outros estudos (JIANG *et al.*, 2018; LLESHI *et al.*, 2021; PEYMANFAR; MIRKHAN, 2022; REN; YIN, 2018).

Como o absorvedor piramidal com fractal de Sierpiński ($n = 3$) com aresta de 40 mm apresentou resultados próximos a sua versão sólida, foi feita uma comparação entre eles, que é apresentada na Figura 42. De forma a confirmar que os padrões internos são os responsáveis pelo efeito observado, também foram feitas simulações com partes ocas internas. As pirâmides com um único interior oco foram produzidas com remoção de material interno equivalente a uma versão menor da pirâmide. Entretanto, nos testes, verificou-se que a variação nos resultados dependia quase que exclusivamente da quantidade de material utilizado na pirâmide, não agregando nenhum fenômeno adicional relevante ao resultado.

Figura 42 - Gráfico do parâmetro $|S_{11}|$ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para absorvedores piramidais equiláteros utilizando o fractal de Sierpiński com $n = 3$, versão com pirâmide sólida e versão com pirâmide oca com casca de 4 mm, com $e = 40$ mm, $h = 20$ mm e onda EM incidente de 0° em relação a normal.

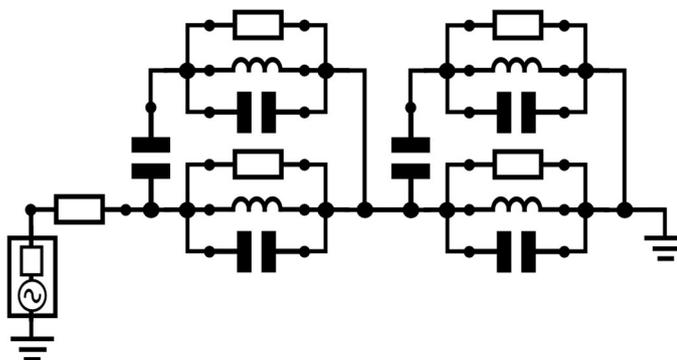


Fonte: Próprio autor

Analisando os resultados obtidos por simulação, o sistema sólido apresenta resultados ligeiramente melhores do que aquele com fractais internos de Sierpiński com $n = 3$. Abaixo de 9 GHz, o absorvedor fractal tem desempenho pior que a versão sólida, mas com níveis de absorção superiores a 90% (-10 dB). Acima de 9 GHz, as absorções estão abaixo de -20 dB (absorção de 99%), com diferenças na ordem de 5 dB ou menos, quando comparada com sua versão sólida. Quando calculada a absorptividade, essa diferença é de -5 dB é inferior a 1%. Em frequências onde o parâmetro $|S_{11}|$ simulado está abaixo de -30 dB (99,9% de absorção) na versão sólida e na versão fractal, essas diferenças caem para menos de 0,1% nos parâmetros de absorção, indicando que o absorvedor fractal acaba sendo uma boa opção de projeto, pois tem desempenho semelhante à sua versão sólida na maioria das frequências analisadas, com diferenças insignificantes e utiliza menos material em sua construção (39,1% menos material nas pirâmides do que na versão sólida).

Também foram realizadas simulações com pirâmides equiláteras com interior oco (casca). Quanto mais grossa a casca, mais os resultados se aproximam da versão sólida do absorvedor piramidal. Apesar da versão oca apresentar resultados piores que os obtidos com fractais e versões sólidas, os valores ficaram abaixo de -10 dB (90% de absorção) em frequências acima de 8 GHz. Esse resultado indica que as pirâmides ocas apresentam resultados piores que os padrões internos do tipo fractal. Porém, as pirâmides ocas apresentaram 90% de absorção, o que é descrito como aceitável em diversos outros estudos encontrados na literatura.

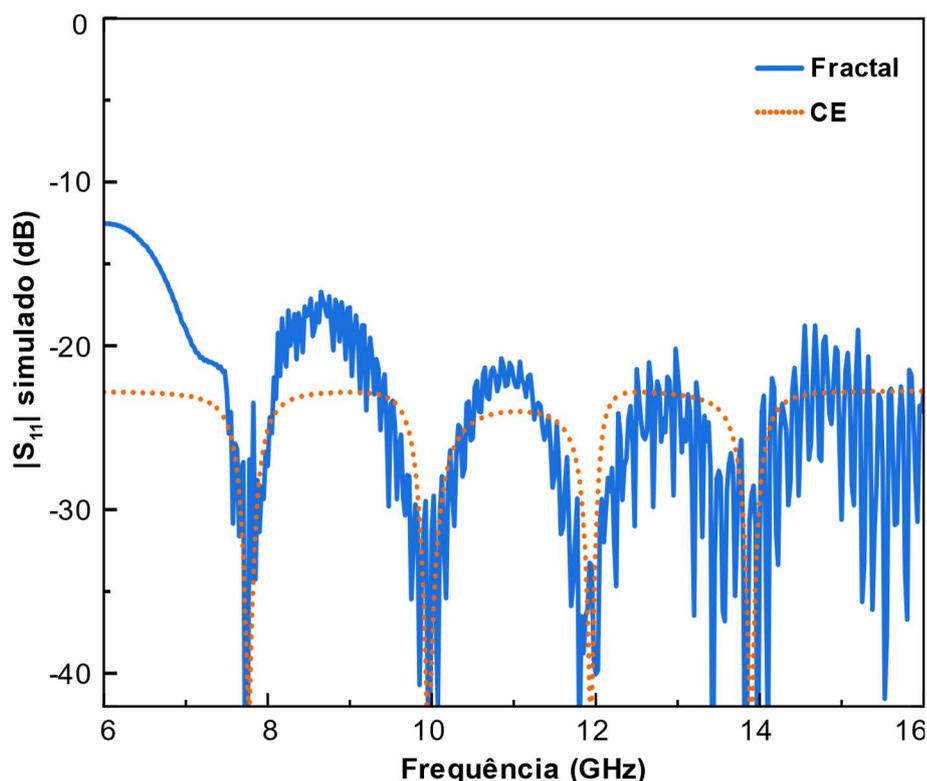
Figura 43 - Circuito equivalente ao absorvedor piramidal equilátero que utiliza o fractal de Sierpiński com $n = 3$.



Fonte: Próprio autor

Em muitos estudos de dispositivos que operam na faixa do micro-ondas, é executado um processo para se obter o circuito equivalente, que é uma aproximação do dispositivo construído em um circuito utilizando-se componentes RLC (Resistor, indutor e capacitor). A aproximação do dispositivo para um circuito equivalente costuma ser útil em situações que demandem baixo esforço computacional, já que diversos programas de simulação de circuitos podem ser empregados e seus parâmetros $|S_{11}|$ podem ser rapidamente obtidos, dispensando o uso de ferramentas complexas de modelagem e simulação eletromagnética (DEARNLEY; BAREL, 1989). A Figura 43 apresenta o circuito equivalente ao absorvedor piramidal equilátero com fractal de Sierpiński com $n = 3$, $e = 40$ mm e $h = 20$ mm. O circuito usa dois conjuntos em série de circuitos RLC paralelos. A presença de um capacitor na entrada de cada circuito RLC paralelo permite seu desacoplamento a certas frequências. O resistor de entrada produz atenuação adicional e permite que o circuito equivalente se aproxime do absorvedor. Este circuito equivalente é semelhante ao utilizado em trabalhos com antenas que utilizaram geometrias fractais de Sierpiński (ANGUERA *et al.*, 2004).

Figura 44 - Gráfico do parâmetro $|S_{11}|$ simulado (dB) em função da frequência (GHz) para absorvedores piramidais equiláteros utilizando o fractal de Sierpiński com $n = 3$, e seu circuito equivalente.



Fonte: Próprio autor

A Figura 44, apresenta o gráfico do parâmetro $|S_{11}|$ simulado do absorvedor com fractal $n = 3$, $e = 40$ mm e $h = 20$ mm e de seu circuito equivalente (CE) para as frequências utilizadas neste estudo. O circuito equivalente fornece uma boa aproximação para a curva do parâmetro $|S_{11}|$ do absorvedor. Porém, o circuito equivalente é capaz de representar corretamente o que ocorre acima de 7,5 GHz, que é onde se inicia a difração.

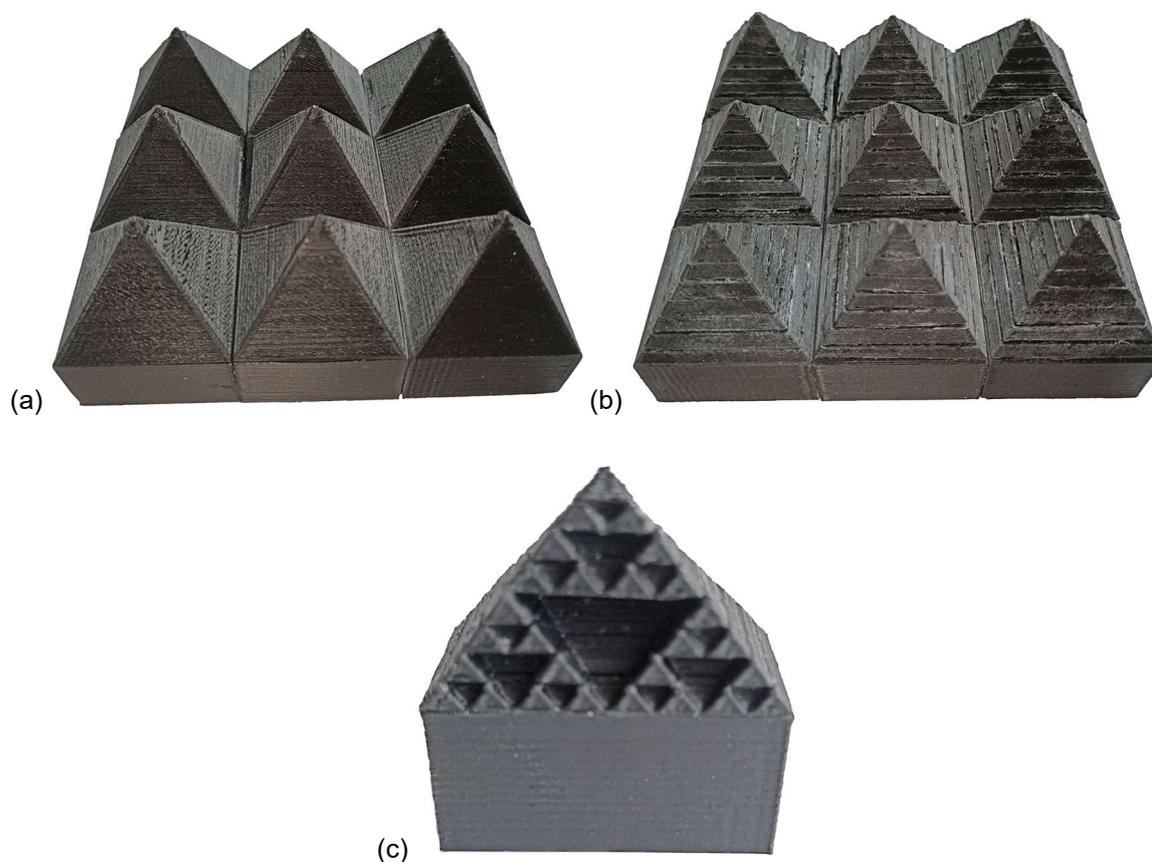
Em frequências abaixo de 7,5 GHz, ocorrem outros tipos de interações físicas com o absorvedor e o circuito equivalente foi projetado para representar uma maior aproximação possível dos resultados obtidos com os fenômenos de difração, refração, reflexão e absorção dos materiais que ocorrem com o absorvedor fractal a partir de 7,5 GHz.

6.5 Produção dos absorvedores

Os absorvedores foram construídos utilizando-se uma impressora modelo Prusa I3 Rework com cabeça de impressão Diamond e bico de saída de 0,6 mm. A velocidade de impressão padrão foi configurada para 35 mm/s. A espessura da camada impressa foi mantida em 200 μ m, a mesma adotada para impressão da lente, sendo a espessura que apresentou os melhores resultados para o ABSg e estudos anteriores também (GOULAS *et al.*, 2020) mostraram que essa espessura reduz a quantidade de lacunas de ar entre as camadas impressas. Para o fatiamento e geração do Gcode foi utilizado o *software* PrusaSlicer 2.3.3.

O padrão de preenchimento foi definido como “Rectilinear”, que produz camadas com linhas em ângulos alternados de 45° para os lados direito e esquerdo. A densidade de preenchimento foi mantida em 100%, tornando as peças impressas todas as partes preenchidas, como sólidas. A temperatura da mesa de impressão foi fixada em 110°C e a temperatura do bocal de impressão em 240°C. Estes parâmetros de impressão são considerados adequados para o ABSg e para a cabeça de impressão Diamond quando ela está operando com apenas um filamento sendo tracionado. As outras duas entradas de filamentos foram preenchidas com filamento de ABS convencional sem tração durante toda a etapa de impressão.

Figura 45 - Protótipo dos absorvedores impressos ($e = 40$ mm, $h = 20$ mm): (a) versão sólida, (b) com fractais $n = 3$ e (c) a corte transversal em 20mm exibindo as partes ocas do fractal $n = 3$.



Fonte: Próprio autor

Foram produzidos dois tipos de absorvedores, um sólido (Figura 45a) e outro com fractal $n = 3$ (Figura 45b). O programa de fatiamento identifica que a estrutura pode desabar durante a impressão e adiciona pequenos pilares de sustentação. Os pilares adicionam material no momento da impressão, o que poderia comprometer os resultados dos absorvedores, já que eles foram idealizados para operarem sem nenhum tipo de material presente dentro das pirâmides internas ocas. Para evitar o acréscimo de material nas partes internas ocas, as pirâmides foram divididas em 9 fatias e impressas separadamente, sendo que todas as partes foram unidas com cola à base de cianoacrilato.

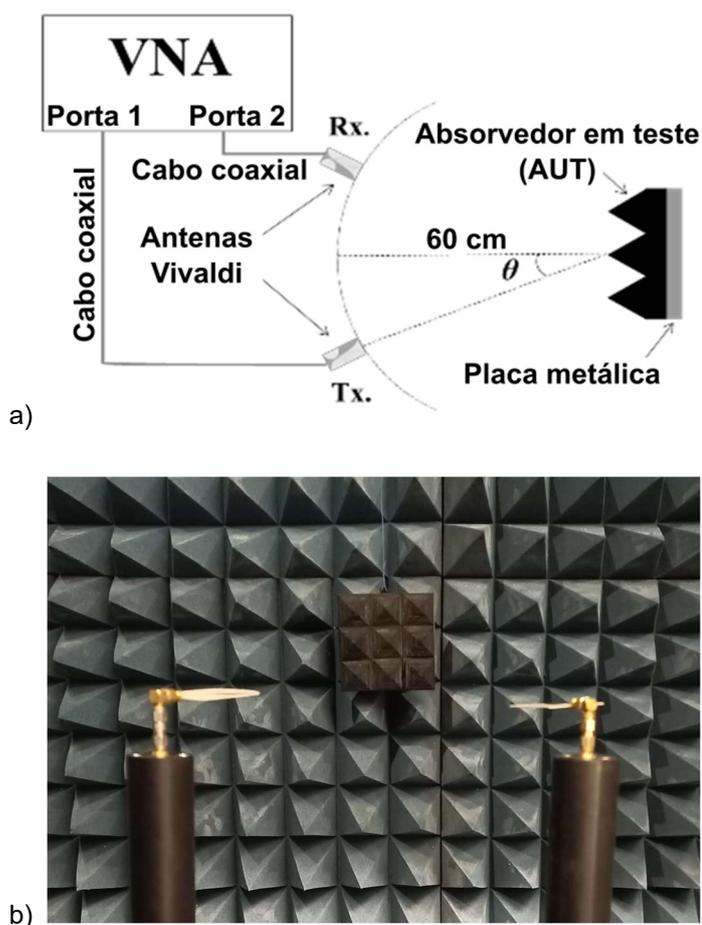
6.6 Procedimentos de medição e análise dos resultados

As medições dos parâmetros $|S_{11}|$ e $|S_{21}|$ foram realizadas com o auxílio de um VNA, modelo HP8722D, com o uso de duas portas. Duas antenas do tipo Vivaldi

otimizadas para a faixa de frequências foram empregadas como referências de transmissor e receptor. Essas antenas já haviam sido caracterizadas em estudo anterior, com boa resposta entre 6 e 16 GHz, que apresentam perda de retorno inferior a -10 dB nessa largura de banda (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021).

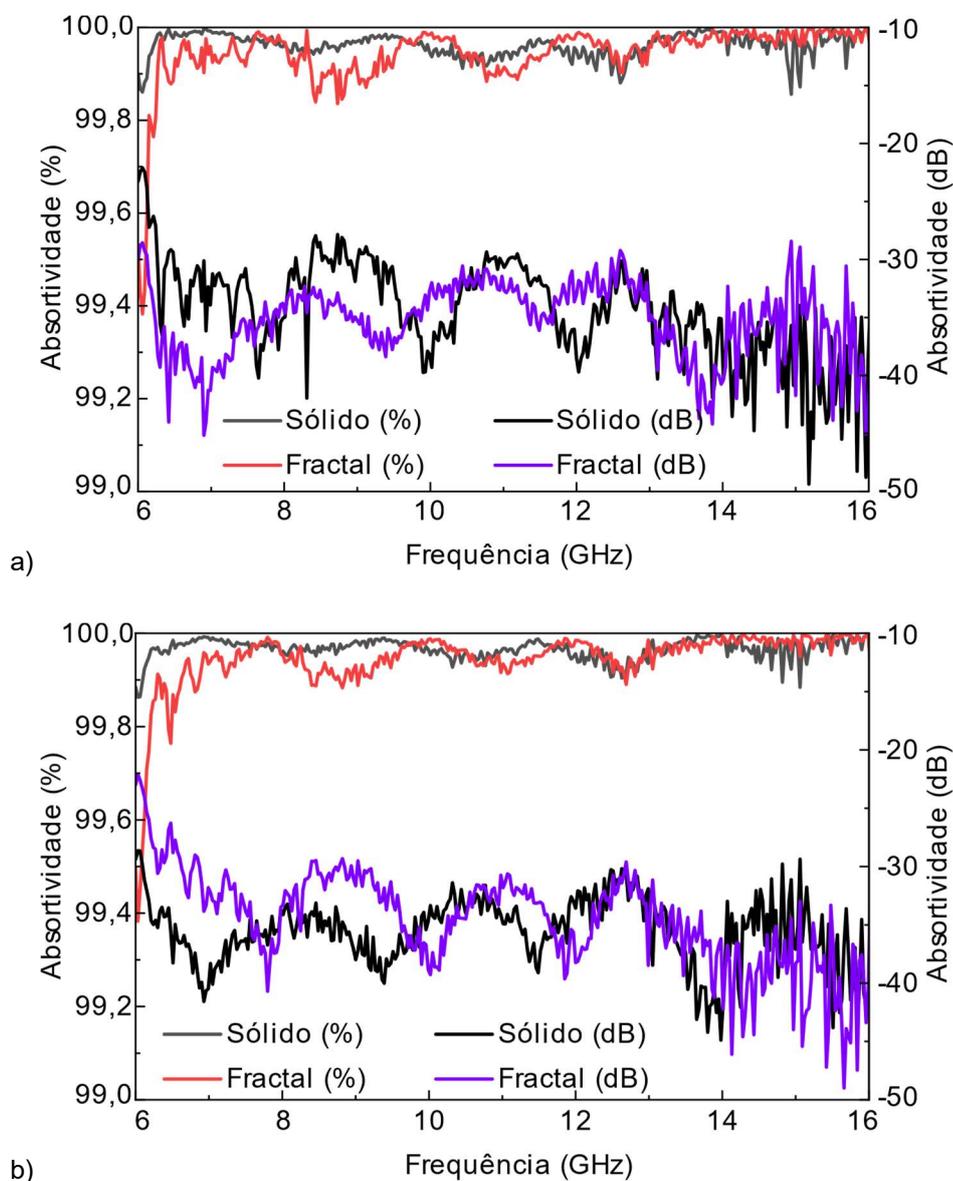
Foi montado um arranjo que permitiu avaliar o desempenho dos absorvedores de micro-ondas fabricados. Com base na literatura, o *setup* seguiu um esquema proposto em vários estudos anteriores (Figura 46a), onde o absorvedor em teste (AUT) é colocado centralmente com uma placa metálica na parte traseira. As antenas são instaladas a uma distância suficientemente grande do AUT (600 mm), sendo maior que a distância de 10λ da frequência inicial de trabalho do AUT, garantindo o comportamento de uma onda plana no campo distante. As antenas são instaladas de forma a formar o mesmo ângulo de incidência com o AUT, mas de lados opostos.

Figura 46 - (a) Esquema do arranjo utilizado para as medidas experimentais. (b) Fotografia do *setup* experimental.



Fonte: Próprio autor

Figura 47 - Medidas de absorção (% e dB) em função da frequência (GHz) para os ângulos de incidência θ em 30° (a) e em 50° (b) para os absorvedores com $e = 40$ mm e $h = 20$ mm, para as versões solidas e com fractais $n = 3$.



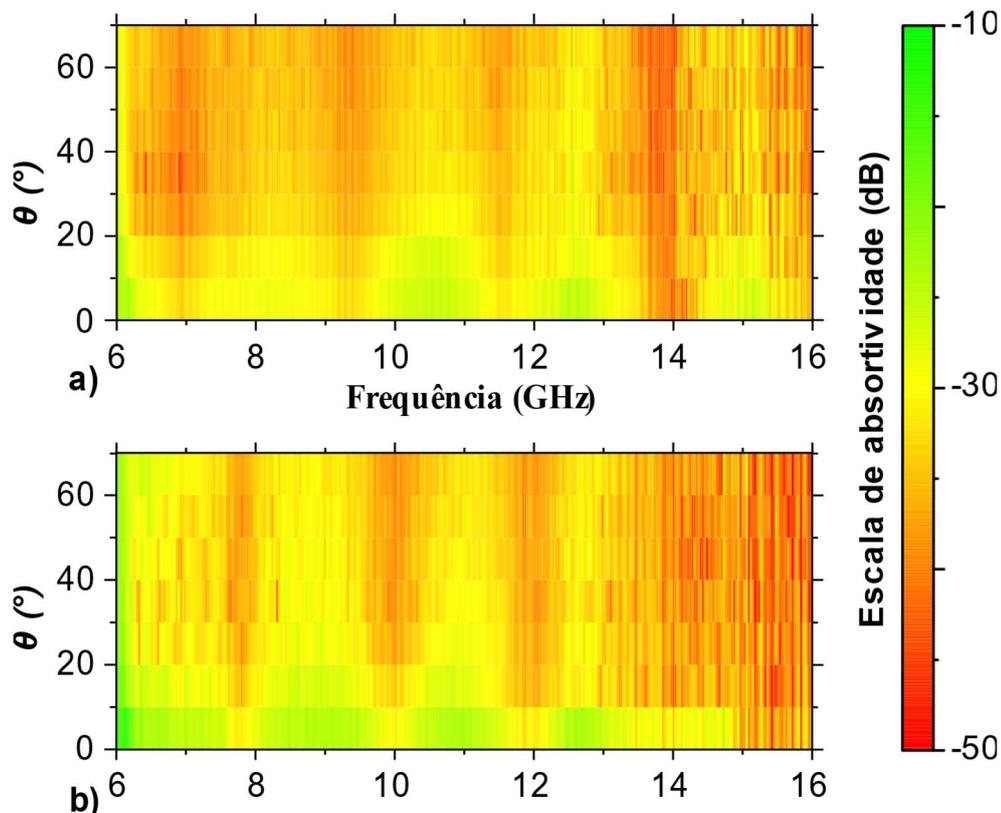
Fonte: Próprio autor

Inicialmente, foram medidas a refletância e a transmitância de micro-ondas com as antenas alinhadas e com espaçamento de 600 mm do AUT que foi colocado no ponto médio e a antena receptora foi colocada no mesmo ângulo do lado oposto. Os parâmetros $|S_{11}|$ e $|S_{21}|$ foram medidos em diferentes ângulos de incidência (CHENG; YANG, 2010; QU; HOU; SHENG, 2021; TAK; CHOI, 2017), variando de 0° a 60° em passos de 10° e a equação 14 proposta por Jiang *et al.* (JIANG *et al.*, 2018) foi utilizada para determinar os absorptividade (A) do AUT. Este sistema é muito

semelhante aos utilizados em espectrômetros óticos, onde um material é colocado sobre uma superfície reflexiva e uma luz ultravioleta, visível ou em infravermelho é utilizada como fonte emissora e do outro lado existe um detector para se medir a absorção da luz em relação a sua fonte emissora (DE OLIVEIRA NETO *et al.*, 2019; PERKAMPUS, 2013).

A Figura 47 apresenta os resultados de absortividade em % e em dB para os ângulos de incidência (θ) em 30° (a) e 50° (b) para a versão impressa dos absorvedores na versão sólida e fractal ($n = 3$) com aresta de 40 mm e base com altura de 20 mm. Com exceção das frequências abaixo de 7 GHz, tanto a versão sólida como a fractal apresenta resultados próximos ou superiores a 99,9%. Acima de 14 GHz, a versão fractal apresenta resultados um pouco melhores, com absorções superiores a 99,99%, sendo ligeiramente melhores que a versão sólida (DE OLIVEIRA NETO *et al.*, 2023a).

Figura 48 - Absortividade medida (dB) em função da frequência (GHz) para ângulos de incidência de 0° a 60° em relação a normal em passos de 10° para absorvedores com $e = 40$ mm e $h = 20$ mm, para pirâmides solidas (a) e pirâmides com fractal ($n = 3$) (b).



Fonte: Próprio autor

Analisando os resultados na Figura 48, verifica-se que tanto a versão sólida dos absorvedores e as suas versões fractais, a absorvidade melhora consideravelmente para ângulos de incidência maiores. Como o material utilizado tem uma tangente de perdas muito alta, quanto maior o ângulo de incidência em relação à normal, maior será o caminho interno percorrido pela onda que passa pelas pirâmides, resultando em maior absorção da onda eletromagnética.

Adicionalmente, verifica-se que a versão fractal possui menor concentração de coloração amarela para verde, com valores superiores a -20 dB (99% de absorção) abaixo de 7,5 GHz. Isso já havia sido verificado na simulação, onde a versão fractal possui resultados semelhantes à versão sólida a partir do início da difração, que ocorre a partir de 7,5 GHz. Acima de 7,5 GHz, a versão fractal ($n = 3$) apresenta valores de absorção ligeiramente inferiores ao sólido, com diferenças inferiores a 0,9%, pois a maioria dos valores está entre -20 dB (99% de absorção) e -30 dB (99,9% de absorção).

Acima de 14 GHz, o absorvedor com fractal $n = 3$ apresenta resultados melhores que sua versão sólida. Isso pode ser atribuído à presença de espaços internos dos fractais $n = 1$, onde as pirâmides invertidas com arestas de 20 mm, que também é o comprimento de onda para 15 GHz e a partir de frequências próximas há uma melhora considerável na absorção para a versão fractal, produzindo dispersão interna adicional pelo efeito de difração.

A presença de ar no interior das pirâmides também favorece a ocorrência de fenômenos adicionais de refração e reflexão, aumentando consideravelmente o caminho percorrido pela onda no interior da pirâmide em relação à sua versão sólida. Essa maior distância percorrida pela onda fica mais evidente ao analisar os resultados em ângulos de incidência maiores que 0° , onde o caminho percorrido pela onda acaba sendo bem maior acima de 14 GHz, sofrendo muito mais absorção na versão fractal. Espera-se que o mesmo tipo de efeito ocorra a 30 GHz, para as pirâmides internas $n = 2$ com bordas de 10 mm e a 60 GHz para as pirâmides internas $n = 3$ e bordas de 5 mm.

7. DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS QUE UTILIZEM FILAMENTOS CONDUTIVOS

Diversos trabalhos na literatura já relatam sucesso no desenvolvimento de sensores utilizando filamentos condutivos a base de PLA e grafite. Um trabalho desenvolvido por Stefano *et al.* já havia apresentado um método para produzir filamentos condutivos a partir da incorporação de grafite e ouro em uma matriz polimérica a base de PLA. O trabalho é finalizado com a construção de sensores utilizando os filamentos desenvolvidos e confirmando que eram eficazes em detectar a presença do vírus SARS-CoV-2 em amostras coletadas (STEFANO *et al.*, 2022).

Em um outro trabalho desenvolvido por Lazarus e Tsang, foi discutido como as peças com estruturas complexas poderiam incorporar componentes eletrônicos através de técnicas de impressão 3D do tipo FDM com a utilização de filamentos condutivos a base de PLA com carga de carbono (PLAc). Alguns pequenos circuitos foram desenvolvidos sobre esferas e superfícies planas exatamente para confirmar a viabilidade na construção de trilhas condutivas nos objetos impressos. Também foi explorada a melhoria da condutividade do PLAc através de processos de galvanização das trilhas. Esse trabalho é finalizado com a apresentação de um circuito completo de um temporizador com o CI 555 com placas e trilhas 100% produzidas com técnicas de impressão 3D (LAZARUS; TSANG, 2020).

Na área de dispositivos de micro-ondas, o filamento de PLAc tem diversos tipos de aplicações documentadas. Um exemplo de seu uso foi apresentado no trabalho de Marquez-Segura *et al.* em que o filamento de PLAc foi caracterizado nas frequências de 12 a 18 GHz e utilizado na produção de um protótipo de atenuador de micro-ondas com palhetas rotativas. O protótipo foi construído tendo suas propriedades analisadas e demonstrando que o PLAc pode ser efetivamente utilizado na produção de dispositivos de micro-ondas. (MARQUEZ-SEGURA *et al.*, 2021).

Na área de transferência de energia, alguns poucos trabalhos, como o de Hou *et al.* (HOU *et al.*, 2018) exploram o uso de técnicas de impressão 3D no desenvolvimento de dispositivos que sejam capazes de transferir energia sem o uso de fios. Essa técnica é conhecida como WPT, do inglês, *Wireless Power Transfer*, ou transferência de energia sem fio. Hou *et al.* descreveu um dispositivo que utilizou circuitos que possuem substratos impressos com filamentos a base de PLA e bobinas impressas com tinta condutiva para transferência indutiva de energia. Estes

dispositivos de transferência indutiva de energia são conhecidos como IPT (do inglês, *Inductive Power Transfer*).

Ainda na área de transferência de energia, diversos trabalhos, como o de Erel *et al.* (2022), destacam o potencial que dispositivos de transferência capacitiva de energia (ou CPT, do inglês, *Capacitive Power Transfer*). Foi produzida uma revisão detalhada das técnicas empregadas na produção deste tipo de dispositivo e seus benefícios em relação a outras formas de transferência de energia. Um dispositivo CPT comum pode ser descrito como um sistema de capacitores de placas paralelas. A transferência de energia ocorre entre as placas condutivas dos capacitores, através de um campo elétrico que é produzido entre as placas. Os dois circuitos são isolados de forma semelhante ao que já ocorre em circuitos sem fio de transferência indutiva de energia (Erel *et al.*, 2022).

Um detalhe importante é que não foram identificados trabalhos em CPT que efetivamente tenham explorado os benefícios das técnicas de impressão 3D na produção de deste tipo de dispositivo. Também não foram encontrados trabalhos na literatura que façam uso de algum tipo de material polimérico com capacidade condutiva na produção destes dispositivos. Isto é um indicativo de uma lacuna não explorada, onde as técnicas de impressão 3D e o uso de filamentos condutivos podem ter êxito na construção deste tipo de dispositivo. Os filamentos condutivos poderiam ser utilizados na construção das placas condutivas e filamentos comuns a base de PLA ou ABS poderiam ser explorados na construção dos substratos das camadas dielétricas.

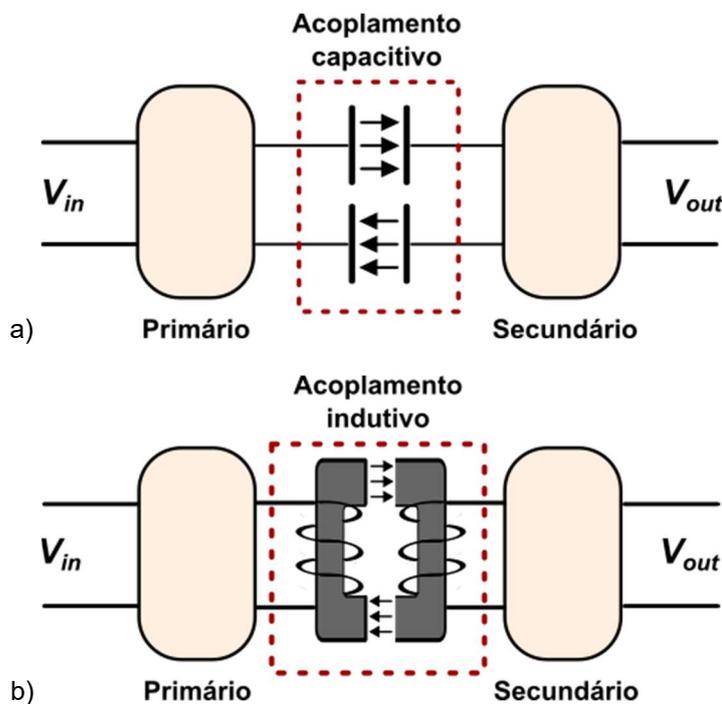
7.1 Técnicas utilizadas para a transferência capacitiva de energia

A transferência capacitiva de energia utiliza um processo de transferência de energia entre dois circuitos utilizando-se de campos elétricos, como exemplificado na Figura 49a. Estes circuitos estão isolados eletricamente entre si, semelhante ao que acontece em circuitos IPT, como exemplificado na Figura 49b.

Os dois tipos de circuitos apresentados na Figura 49 podem ser utilizados em sistemas de transferência de energia em curtas distâncias, quando um circuito está ao lado do outro, como é o caso de circuitos transformadores indutivos. Também é possível utilizar os dois sistemas em distâncias maiores, onde os circuitos primário e

secundário pertencem a dispositivos diferentes, implementando o que é conhecido como WPT.

Figura 49 – Esquema simplificado de um circuito CPT (a) e IPT (b).



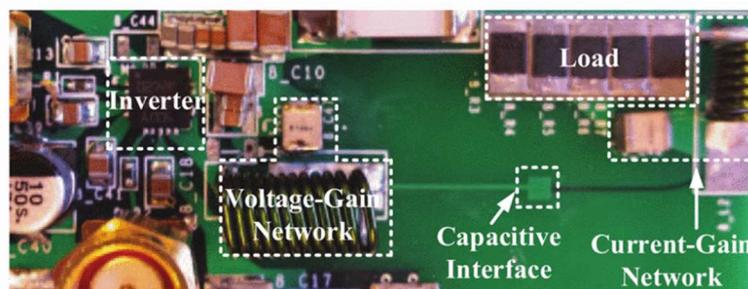
Fonte: Próprio autor

No caso de circuitos CPT, diversos formatos podem ser aplicados na construção das placas paralelas necessárias para o estabelecimento do acoplamento capacitivo. Um método de construção utilizando placas de FR4 foi explorado por Sinha, Kumar e Afridi. No seu trabalho, foi demonstrado que circuitos CPT podem ser empregados diretamente sobre placas de circuitos impressos do tipo FR4 (Figura 50). O circuito foi otimizado e apresentou um desempenho de transferência de energia próximo a 90% na frequência de 100 MHz. Isto confirmou que a técnica de construção é eficaz no desenvolvimento de circuitos CPT diretamente na placa de circuitos eletrônicos (SINHA; KUMAR; AFRIDI, 2018).

Em um outro trabalho desenvolvido por Sodagar e Amiri, foi apresentada uma nova técnica que permite estabelecer a transferência de energia e a transferência de dados em implantes biomédicos (Figura 51). Este trabalho é importante porque confirma que a transferência capacitiva de energia possui seus campos elétricos limitados a área de transferência, diferente dos circuitos IPT, onde a transferência indutiva leva a interferência em circuitos próximos. Também valida o uso da pele

humana como material dielétrico e que o acoplamento capacitivo também pode ser utilizado para transferência de dados de telemetria em equipamentos implantados sob a pele (SODAGAR; AMIRI, 2009).

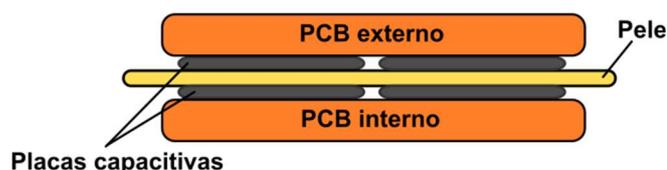
Figura 50 – Foto do protótipo do circuito apresentado por Sinha, Kumar e Afridi.



Fonte: Sinha, Kumar e Afridi, 2018

Ainda na área de dispositivos biomédicos, Sedehi *et al.* (SEDEHI *et al.*, 2021) apresentaram um trabalho sobre como a transferência capacitiva de energia poderia ser aplicada a dispositivos implantados dentro do corpo humano. A principal diferença entre o trabalho de Sodagar e Amiri é que a técnica apresentada por Sedehi *et al.* permitiu afimar que é possível colocar o dispositivo interno em qualquer parte interna do corpo e não apenas abaixo da pele. Eletrodos na parte externa, coladas à pele, fazem a transferência capacitiva de energia. Para determinar o funcionamento da técnica, foi montado um experimento com um dispositivo do tipo *Phantom* na forma de um cilindro contendo fluido que simulou as propriedades dielétricas do tecido vivo. O experimento demonstrou que é possível transferir energia para o dispositivo interno respeitando os limites impostos atualmente para campos elétricos em corpos humanos.

Figura 51 – Esquema simplificado em circuito CPT proposto por Sodagar e Amiri para uso em implantes biomédicos.



Fonte: Próprio autor

7.2 A importância da rede de compensação

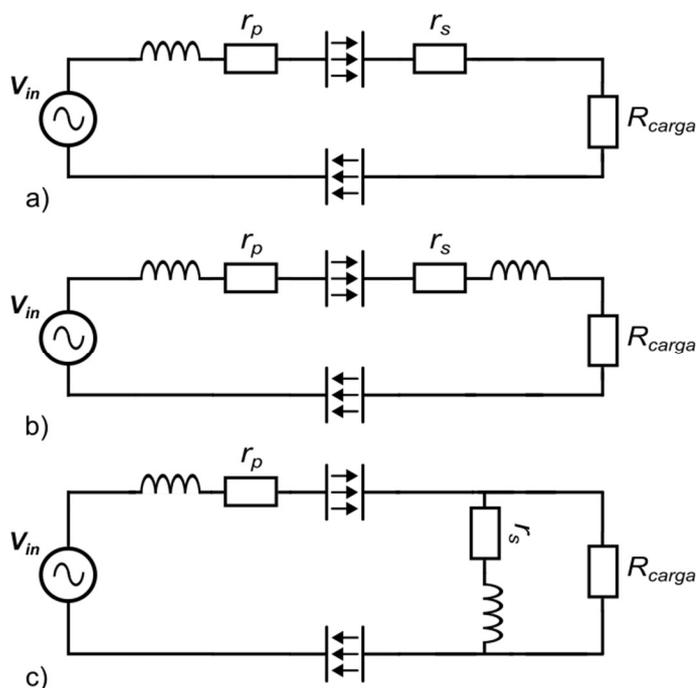
Em qualquer tipo de circuito CPT, o principal problema existente é relacionado ao baixo acoplamento entre as placas. Esse acoplamento normalmente é na ordem de algumas dezenas ou centenas de picofaraday entre as placas do circuito capacitivo. O baixo acoplamento entre as placas impede uma transferência de energia satisfatória entre os dispositivos acoplados. Para solucionar este problema, pode-se aumentar a frequência de operação ou a tensão empregada no lado do circuito primário. O problema com estas abordagens é que a alta frequência pode levar a perdas significativas no conversor. O aumento de tensão é limitado à tensão de ruptura do meio ou de legislações que controlam a intensidade do campo elétrico (LECLUYSE; MINNAERT; KLEEMANN, 2021).

Para contornar o problema do baixo acoplamento entre as placas dos circuitos CPT, utiliza-se o que é conhecido como rede de compensação (*compensation networks*) ou rede de casamento (*matching networks*). Estas redes criam ressonância em frequências mais baixas, produzindo uma comutação mais suave, com o intuito de melhorar o acoplamento entre as placas primárias e secundárias do circuito CPT (LU; ZHANG; MI, 2017; MOON, 2021).

A principal função da rede de compensação do lado primário é intensificar a tensão, como forma de garantir a passagem pelas altas impedâncias, que é causada pela baixa capacitância entre as placas. Do lado do secundário, a rede de compensação é utilizada para garantir o aumento da corrente, com redução da tensão, como forma de garantir uma melhoria efetiva na transmissão de energia entre as partes acopladas (LECLUYSE; MINNAERT; KLEEMANN, 2021).

Diversos tipos de circuitos de compensação podem ser utilizados, com várias configurações diferentes. A mais simples é a rede de compensação tipo L (com indutor). A rede é construída utilizando-se indutores, que normalmente são ligados em série no primário do circuito CPT. No circuito secundário, é comum encontrar 3 configurações. A primeira é com uso apenas no primário, sem indutor acoplado ao circuito secundário (Figura 52a). Um indutor pode ser ligado em série ao circuito secundário da mesma forma que no circuito primário (Figura 52b) ou ainda ligado em paralelo ao circuito secundário (Figura 52c). Ao utilizar este tipo de rede haverá uma significativa melhora de desempenho do circuito CPT, principalmente em frequências mais baixas (KURODA; IMURA, 2020).

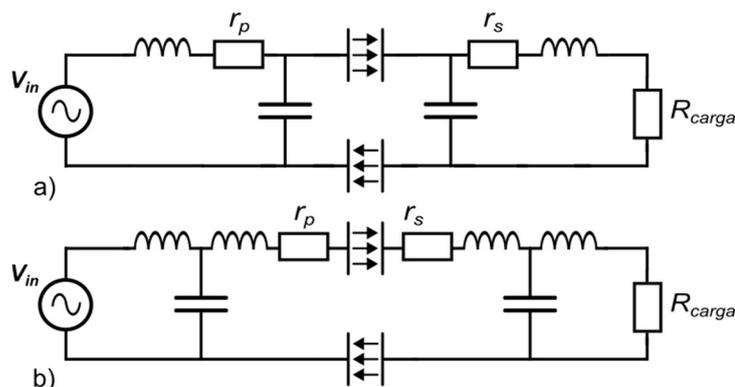
Figura 52 – Esquema simplificado de circuitos CPT com rede de compensação com indutores. Indutor apenas no circuito primário (a). Indutor em série no primário e secundário (b). Indutor em série no primário e em paralelo no secundário (c). r_p e r_s são representações das perdas resistivas nos circuitos primário e secundário.



Fonte: Próprio autor

Também é possível utilizar uma rede de compensação do tipo *LC* (indutor-capacitor). Esta rede é produzida adicionando-se capacitores em paralelo ao circuito CPT com indutores (Figura 53a). Ao se incluir capacitores na rede de compensação, ocorre o aumento da capacitância geral do circuito. Isto eleva a capacitância equivalente do circuito CPT e o torna menos sensível a oscilação em função da variação da distância entre as placas (LU *et al.*, 2018). Também melhora significativamente o desempenho de transferência de energia do circuito e mantém a frequência de ressonância sem alterações significativas. É comum encontrar uma variação deste circuito com a adição de mais um indutor em série, formando um circuito LCL (Figura 53b). Segundo Kodeeswaran e Gayathri, um circuito LCL pode ser utilizado para reduzir o tamanho dos indutores presentes no circuito, aumentando a tensão entre as placas do circuito CPT (KODEESWARAN; NANDHINI GAYATHRI, 2021).

Figura 53 – Esquema simplificado de circuitos CPT com rede de compensação utilizando indutor e capacitor, ou LC (a) e com indutor, capacitor e indutor, ou LCL (b).



Fonte: Próprio autor

Outra possibilidade é a combinação de circuitos de compensação multi estágios. Neste tipo, utilizam-se vários arranjos de redes L , LC ou LCL , combinando vários estágios diferentes com combinações em série e/ou em paralelo. O uso deste tipo de rede de compensação pode produzir um efetivo ganho de desempenho em circuitos de alta tensão ou em circuitos de alta frequência (KUMAR *et al.*, 2018; SINHA; KUMAR; AFRIDI, 2018).

7.3 Caracterização dos materiais que serão utilizados nos processos de modelagem eletromagnética e impressão do protótipo

Para que seja possível executar os trabalhos de modelagem eletromagnética e simulação dos modelos propostos, é necessário que os dados relativos à constante dielétrica do PLA e a condutividade do PLAc sejam obtidos através de processos de caracterização dielétrica e medidas de condutividade com instrumentos específicos para esse fim.

Para as medidas da constante dielétrica, a seção 4.3 deste trabalho já havia apresentado diversas técnicas que permitiam a caracterização dielétrica de vários tipos de materiais. Como estamos trabalhando nesta seção com dispositivos capacitivos, decidiu-se por utilizar um analisador de circuitos RLC da marca HP, modelo 4275A (Figura 54), que permite medir a impedância, indutância e capacitância de circuitos acoplados ao equipamento.

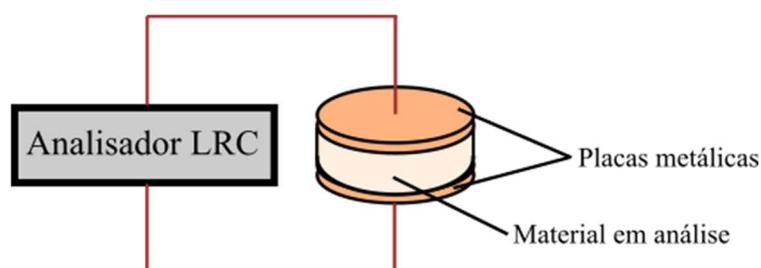
Figura 54 – Foto do equipamento utilizado na análise da impedância e capacitância do capacitor de placas paralelas montado para o teste.



Fonte: Próprio autor

De acordo com Jilani *et al.*, (JILANI *et al.*, 2012) é possível utilizar um equipamento de análise de impedância e capacitância para obter o valor da constante dielétrica do material em análise. Para isso, é medida a capacitância do circuito utilizando-se um capacitor de placas paralelas com o material em análise sendo o meio dielétrico do capacitor (Figura 55).

Figura 55 – Esquema de um analisador LRC para análise da capacitância utilizando um capacitor de placas paralelas.



Fonte: Próprio autor

Para que seja possível calcular a constante dielétrica, utiliza-se a equação 15 de cálculo da capacitância para capacitores de placas paralelas:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (15)$$

Em que C é a capacitância do circuito medida em *farads*, ϵ_r é a constante dielétrica do material dielétrico colocado entre as placas, ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo, que é de $8,8541878176 \times 10^{-12}$ F/m, A é a área das placas em contato com o material e d é a distância entre as placas.

Com o equipamento e o esquema proposto na Figura 55, foram executadas diversas medidas de impedância com capacitor de placas paralelas produzidas com um cilindro impresso em PLA convencional com diâmetro de 50 mm e altura de 3 mm. Foram coladas folhas de cobre de 0,1 mm de espessura na parte superior e inferior do cilindro para funcionar como placas paralelas. As medidas de impedância são apresentadas na Tabela 3. O analisador de capacitância trabalha com frequências fixas com os valores apresentados na Tabela 3. Verifica-se que o valor calculado para a constante dielétrica do material analisado varia em função da frequência com seu valor oscilando entre 3,15 em 10 kHz a 3,01 em 10 MHz.

Em trabalhos, como o de Huber *et al.* (HUBER *et al.*, 2016) que estimou os valores de ϵ_r na faixa dos 10 GHz para o PLA com duas técnicas diferentes entre 3,55 e 3,47. Felício, Fernandes e Costa (FELICIO; FERNANDES; COSTA, 2016) conduziram experimentos para determinar o valor de ϵ_r do PLA utilizando microlinhas e para 40 GHz foi determinado o valor de 2,9 e para 60 GHz 3,05. Estes trabalhos, mesmo exibindo resultados bem divergentes e em várias frequências diferentes, demonstram que o valor de ϵ_r do PLA sofre variações, com valores entre 2,9 e 3,55. Como as medidas obtidas experimentalmente neste trabalho estão dentro da faixa de variação encontrada na literatura, é razoável assumir que elas são coerentes com o esperado para o PLA. Esta variação das medidas do PLA pode vir de diversos fatores, como aditivos que são incluídos no processo de produção do PLA. Estes aditivos visam o atendimento de legislações locais, adição de compostos bactericidas ou outros materiais para evitar degradação por incidência de raios ultravioleta.

Para as medidas do PLAc, foi utilizado um equipamento da marca Sinton Consulting que faz medidas de fotocondutividade usando pequenas placas com espessura de até 1 mm produzidas com o material a ser analisado. As medidas indicaram que o PLAc analisado possui condutividade na ordem de 0,396 S/m. Em alguns estudos, como o de Huber *et al.* foi descrito que o PLAc da marca Proto Pasta possui resistividade de 115 Ω .cm. Como a condutividade é o inverso da resistividade, pode-se calcular a condutividade do PLAc da marca Proto Pasta em 0,87 S/m. A divergência nos valores encontrados do PLAc pode ser explicada por diferenças no

processo de produção de seus fabricantes, que não possui uma norma ou legislação vigente determinando as propriedades de condutividade deste tipo de material ou pela adição de aditivos, da mesma forma que ocorre com o filamento de PLA.

Tabela 3 – Valores obtidos nas medidas de caracterização dielétrica do PLA utilizando o método de capacitores de placas paralelas.

Frequência (KHz)	Capacitância (pF)	ϵ_r
10	18,23	3,15
20	18,17	3,14
40	18,10	3,12
100	17,96	3,10
200	17,88	3,09
400	17,82	3,08
1000	17,62	3,04
2000	17,50	3,02
4000	17,49	3,02
10000	17,41	3,01

Fonte: Próprio autor

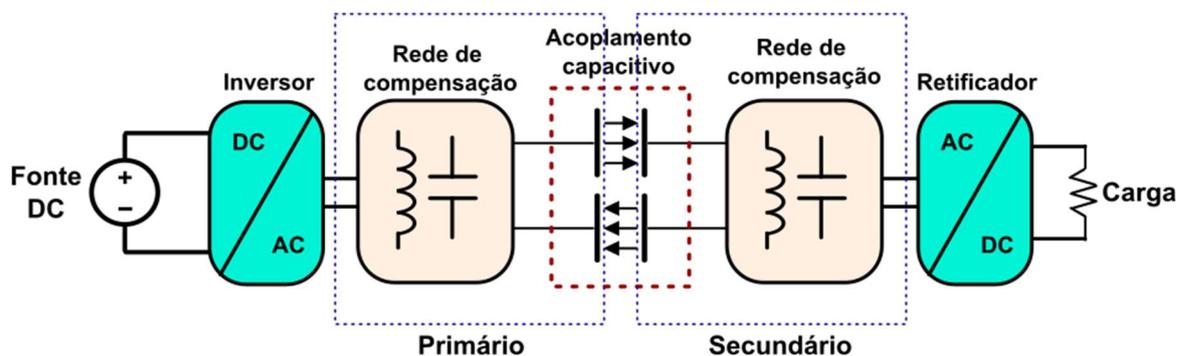
7.4 Modelagem conceitual do dispositivo CPT proposto

Com a constante dielétrica do PLA e a condutividade do PLAc obtida, é possível modelar um circuito CPT em um simulador. Em qualquer modelo simulado, as configurações relacionadas aos materiais são necessárias para se definir suas interações dentro do simulador.

Um dispositivo CPT completo é apresentado na Figura 56. Ele é composto de diversos estágios, semelhante aos circuitos IPT. O desenvolvimento de um circuito capacitivo envolve a modelagem do acoplamento capacitivo e das redes de compensação primária e secundária. O restante do circuito é semelhante ao encontrado em circuitos IPT.

No formato mais comum, os circuitos CPT funcionam utilizando dois capacitores de placas paralelas. No projeto proposto, não há espaços com lacunas de ar, já que a transferência capacitiva foi feita com 4 placas fixas em um circuito sem movimentação entre elas.

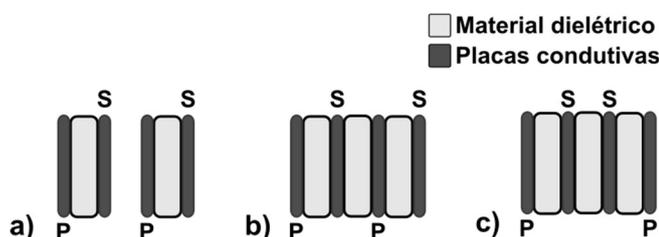
Figura 56 – Esquema completo de um circuito CPT.



Fonte: Próprio autor

Como apresentado na Figura 56, quatro placas são necessárias para produzir o acoplamento capacitivo no modelo analisado. Como o circuito é fixo, sem movimentação, as placas podem ter alguns arranjos possíveis (Figura 57) e cada configuração deve ser analisada com o auxílio de um programa de simulação eletromagnética para determinar qual é a melhor configuração.

Figura 57 – Possíveis formas de disposição de um circuito CPT fixo com 4 placas paralelas.



Fonte: Próprio autor

A Figura 57a apresenta dois conjuntos de duas placas paralelas condutoras (primário e secundário), que serão modeladas utilizando-se como base os dados do material de PLAc. Para a camada de material dielétrico, serão utilizados os dados obtidos do PLA convencional. Os dois conjuntos são fisicamente separados. Em uma outra configuração possível, os dois conjuntos de placas ficam próximas e é necessário adicionar uma camada de material dielétrico entre elas. A Figura 57b e a Figura 57c apresentam possíveis configurações com 4 placas condutoras separadas por 3 placas de material dielétrico. A diferença entre elas é apenas na disposição das placas primárias (P) e secundária (S) entre as camadas dielétricas, estando na configuração PSPS (Figura 57b) e PSSP (Figura 57c).

A análise levou em consideração a espessura e a área de contato entre as placas. Com esta análise, foi possível determinar a melhor configuração que posteriormente foi construída com o auxílio de uma impressora 3D. A impressão utilizou o PLA convencional como material dielétrico e o PLAc como material para as placas condutivas.

Após a finalização do dispositivo CPT, uma rede de compensação deve ser desenvolvida de forma a garantir o melhor desempenho do dispositivo. Para o desenvolvimento da rede de compensação, o próprio programa de simulação eletromagnética CST (CST STUDIO SUITE, 2020) dispõe de uma seção interna dedicada ao desenvolvimento de circuitos elétricos e eletrônicos. Este circuito pode ser acoplado ao simulador eletromagnético, permitindo obter simulações integradas, medindo o desempenho do circuito, com análise de tensão em função da frequência.

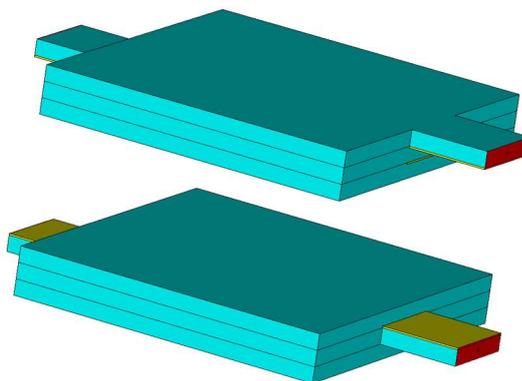
7.5 Modelagem eletromagnética e simulação

A modelagem do circuito CPT foi executada com o auxílio do *software* de simulação eletromagnética CST Studio 3D EM (CST STUDIO SUITE, 2020).

Inicialmente, foi projetado um circuito com duas placas paralelas distintas semelhante ao esquema apresentado na Figura 57a. Para executar as simulações eletromagnéticas, foi necessário simular a presença de um circuito acoplado ao primário com uma fonte AC de 100V operando em um intervalo de frequência de 0 a 2 GHz. No circuito secundário, seus dois pontos foram colocados em curto-circuito e foi acoplada uma ponta de prova simulada que permitia obter as medidas de corrente e tensão entre as placas do secundário. A Figura 58 apresenta a primeira versão que foi simulada do circuito CPT, onde dois conjuntos de placas separadas foram simuladas.

As placas amarelas são as placas condutivas simuladas com material PLAc e as placas nas cores azul claro são placas simuladas de PLA convencional (Figura 58). O material PLAc foi definido como sendo do tipo “metal com perdas” (*Lossy metal*) com condutividade de 0,396 S/m. O material PLA foi definido como sendo do tipo “normal” e sua constante dielétrica foi definida em 3,15. Estes valores foram obtidos experimentalmente na seção 7.3. As partes vermelhas são as portas por onde o simulador eletromagnético do CST permite acoplar o circuito simulado.

Figura 58 – Primeira versão otimizada do circuito CPT com dois conjuntos de placas separadas.



Fonte: Próprio autor

Como o PLAc possui resistividade de $2,53 \Omega/\text{m}$, a espessura da placa poderia influenciar nas propriedades do campo elétrico. Algumas simulações preliminares foram realizadas para determinar o comportamento do campo elétrico em relação à espessura da placa condutiva. Como as placas serão posteriormente impressas com impressoras 3D, foram analisadas espessuras com múltiplos de $200 \mu\text{m}$. Este valor foi determinado com base na altura da camada impressa, que segundo a seção 4.5, o valor de $200 \mu\text{m}$ tem a melhor relação de adesão entre as camadas impressas e minimização de *gaps* de ar entre as camadas.

A placa com espessura de $200 \mu\text{m}$ apresentou os melhores resultados na produção do campo elétrico, sendo o valor adotado para espessura das camadas condutivas para as próximas simulações.

Apenas a área das placas e a distância entre elas possui influência na capacitância (equação 15). Como as placas condutivas são muito finas, na espessura de $200 \mu\text{m}$, necessitariam de algum suporte, caso fossem impressas. Para resolver este problema, que só apareceria no momento da impressão, foram modeladas duas placas adicionais, uma superior e uma inferior que servem como base para as placas condutivas na parte mais externa.

Em circuitos de transferência de energia, o melhor circuito é aquele que promove a maior transferência de energia. Como o circuito é simulado, foi incluído um curto-circuito na saída do primário e a corrente existente neste ponto foi analisada com o auxílio em um gráfico da corrente em função da frequência que foi utilizado para determinar qual configuração produzia a maior corrente de saída. O melhor

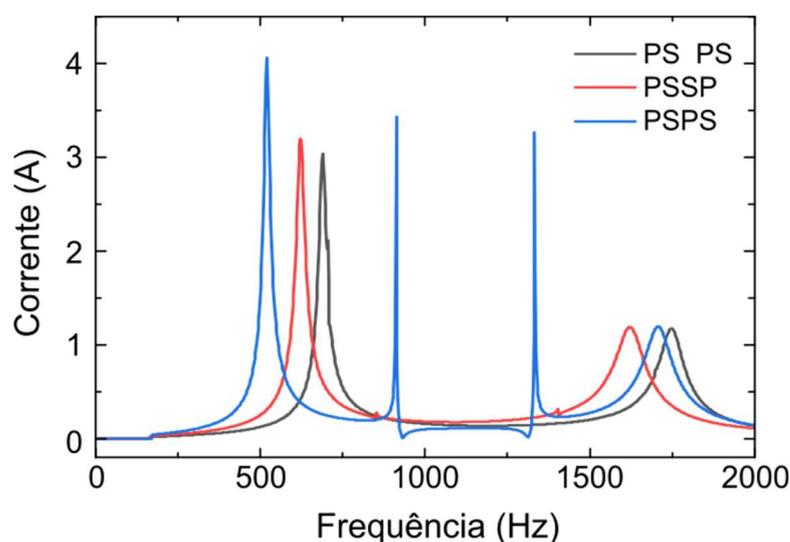
arranjo foi escolhido como o de maior corrente, independente da frequência onde o máximo de corrente se apresentou.

Ao todo, três parâmetros foram avaliados através de um processo de otimização e o gráfico da corrente em função da tensão de saída no secundário foi utilizado como resultado da simulação. Os parâmetros avaliados foram o comprimento da aresta da camada dielétrica e_d , a altura da camada dielétrica h_d e a largura da placa condutiva w_c (o comprimento é o mesmo da aresta da camada dielétrica).

Depois de algumas simulações, os resultados não eram satisfatórios, com transferências de energia quase insignificantes entre primário e o secundário. Conforme discutido na seção 7.2, uma rede de compensação é necessária para amplificar o efeito de transferência capacitiva de energia. Após alguns testes, verificou-se que a adição de uma rede de compensação do tipo L com um indutor de 33 nH ligado em série a cada uma das placas condutivas do primário e secundário produzia um incremento considerável de corrente entre as placas do secundário.

Após o processo de otimização concluído, obteve-se um pico de corrente de 3 A em 688 MHz e outro pico de 1,17 A em 1,750 GHz, conforme a Figura 59. Isto é compatível com o verificado na literatura, pois a presença de indutores produz efeitos de ressonância, amplificando a transferência de energia em determinadas frequências (CHAO LIU *et al.*, 2012). Os valores finais para os parâmetros otimizados foram $e_d = 20$ mm, $h_d = 1.0$ mm e $w_c = 5$ mm.

Figura 59 – Corrente simulada em função da frequência para as 3 configurações propostas para análise inicial dos circuitos CPT.

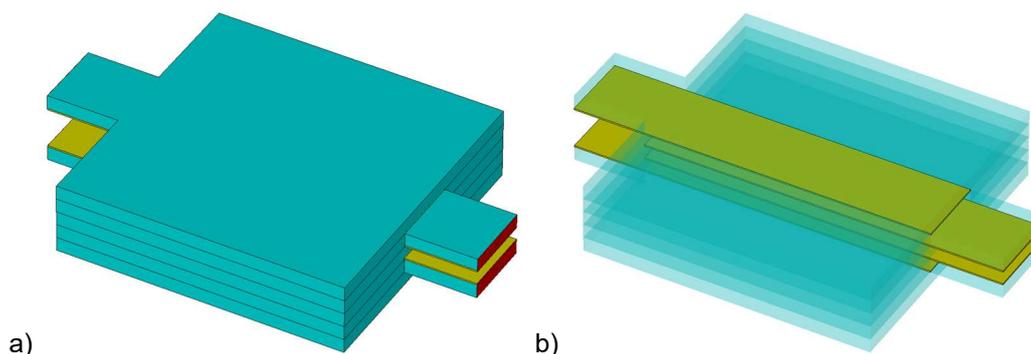


Fonte: Próprio autor

Como o intuito inicial foi determinar qual era o melhor arranjo de disposição entre as placas (Figura 57), os parâmetros definidos com a primeira etapa de simulações foram utilizados para os outros dois arranjos possíveis. Uma versão do novo arranjo que foi simulado é apresentada na Figura 60. A única diferença entre os dois arranjos simulados é a disposição entre as placas condutivas, dispostas na ordem PSPS e PSSP.

A segunda configuração analisada foi PSSP, que apresentou resultados ligeiramente melhores que o resultado da configuração anterior, com um pico de corrente de 3,19 A em 620,7 MHz e outro pico de 1,19 A em 1622,2 MHz (Figura 59). Apesar da configuração PSSP apresentar resultados ligeiramente melhores que a configuração PS PS, as duas abordagens têm resultados semelhantes, indicando que a distância entre os conjuntos não afetou de forma significativa os resultados.

Figura 60 – Segunda versão simulada do circuito CPT. (a) visão externa e (b) visão interna das placas condutivas.



Fonte: Próprio autor

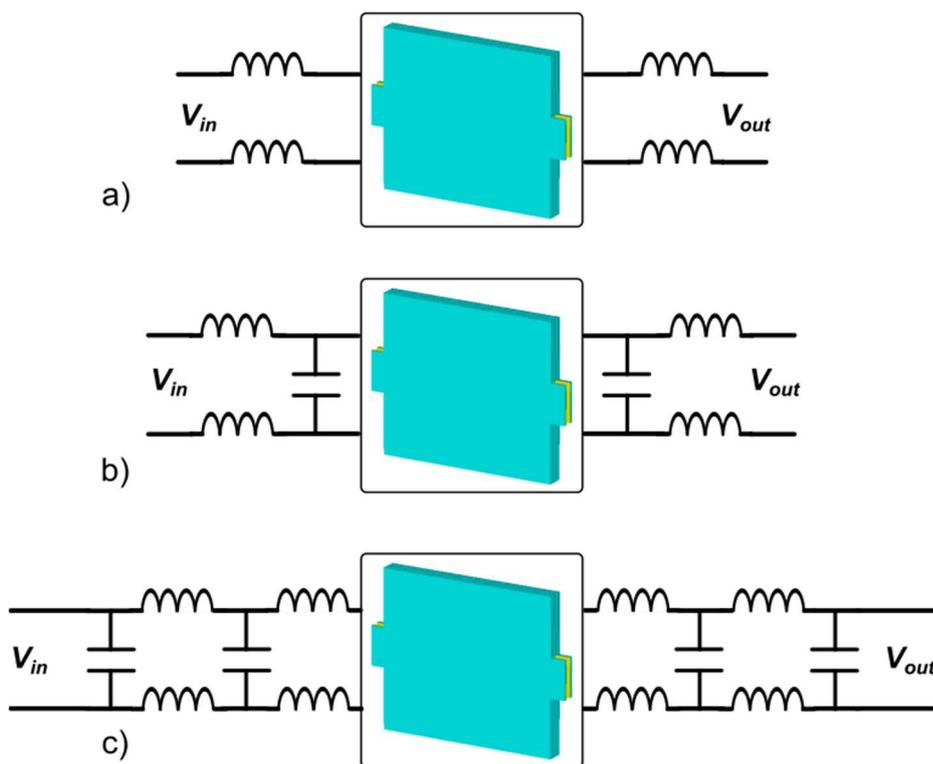
A terceira configuração analisada foi a PSPS, que apresentou o melhor resultado, com correntes com pico de 4,06 A a 518,74 MHz (Figura 59), além de mais 2 picos relevantes com correntes de 3,43 A na frequência de 912,54 MHz, 3,27 A na frequência de 1332,3 MHz e um pico de 1,2 A na frequência de 1708,1MHz. Como os campos elétricos ficam confinados entre as placas do primário e secundário, é razoável afirmar que a configuração PSPS produz dois campos elétricos distintos entre as placas. Já na configuração PSSP, campos elétricos secundários acabam por se formar entre a primeira placa do primário e segunda placa do secundário, o mesmo ocorrendo entre a primeira placa do secundário e a segunda placa do primário. Isso

acaba por prejudicar o desempenho do circuito CPT, reduzindo a eficiência na configuração PSSP.

Tendo como base a configuração PSSP como sendo a melhor configuração testada, os parâmetros e_d , h_d e w_c foram continuamente otimizadas até se chegar as dimensões finais, sendo $e_d = 60$ mm, $h_d = 1.1$ mm e $w_c = 15$ mm. Com estas dimensões, obteve-se um pico de 12,19 A na frequência de 198,9 MHz.

A rede de compensação implementada era muito simples, composta apenas por dois indutores ligados em série (Figura 61a), sendo uma rede de compensação tipo L . Um novo conjunto de simulações foi executado visando otimizar a rede de compensação tipo LC . Após o processo de otimização concluído, foi produzida uma rede de compensação (Figura 61b) com capacitores de 60 pF e indutores de 2.4 nH que produziu um pico de corrente de 39,2 A no secundário na frequência de 272,9 MHz. Como o circuito CPT possui baixa capacitância, trabalhos anteriores já haviam demonstrado que o uso de redes de compensação LC elevam consideravelmente a capacitância do circuito CPT melhorando seu desempenho (KODEESWARAN; NANDHINI GAYATHRI, 2021; LU *et al.*, 2018).

Figura 61 – Redes de compensação testadas para melhoria do dispositivo CPT em ordem cronológica.

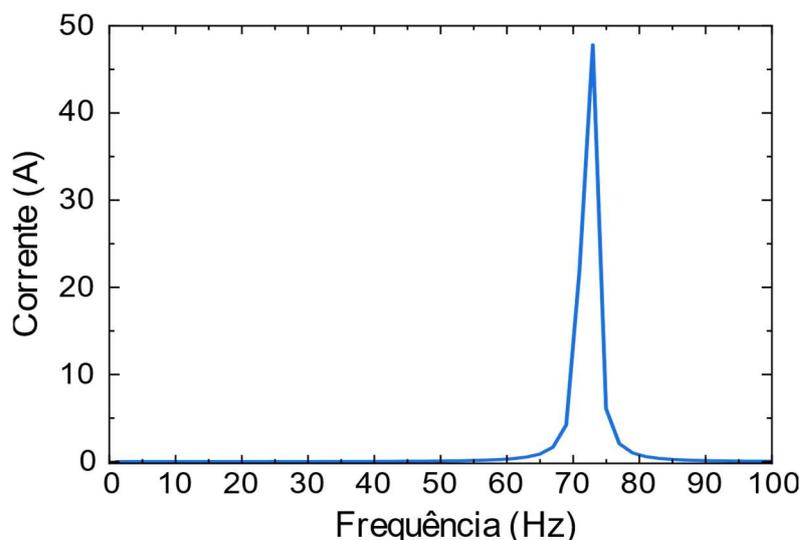


Fonte: Próprio autor

Como apresentado na seção 7.2, uma rede de compensação pode ter vários estágios L ou LC . Vários arranjos com indutores e capacitores foram utilizados visando o aumento de corrente na saída do secundário. Após diversas simulações com vários arranjos, chegou-se à configuração da Figura 61c com capacitores de 230 pF e indutores de 11 nH. A corrente de pico na saída do secundário foi de 15,7 A na frequência de 70,96 MHz. Como ocorreu uma redução considerável da frequência, o circuito CPT foi novamente otimizado em conjunto com sua rede de compensação.

Após a finalização da otimização, verificou-se que o desempenho do circuito CPT melhorou muito atingindo um pico de corrente de 47,82 A na frequência de 72,96 MHz (Figura 62). As dimensões finais foram $e_d = 60$ mm, $h_d = 2,6$ mm e $w_c = 30$ mm. Para a rede de compensação multi-estágio da Figura 61c, os valores dos capacitores são de 220 pF e dos indutores 11 nH.

Figura 62 – Corrente simulada em função da frequência circuito CPT finalizado com a rede de compensação.



Fonte: Próprio autor

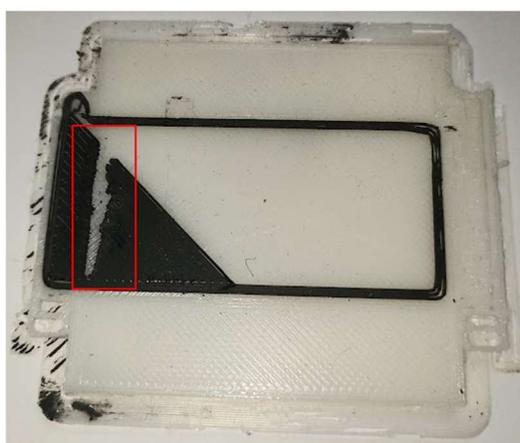
Os valores finais para os capacitores e indutores levaram em consideração a existência de componentes eletrônicos disponíveis para aquisição no mercado. No caso dos indutores, existem indutores de 22 nH que podem ser ligados em paralelo para se obter uma indutância equivalente de 11 nH.

7.6 Produção do dispositivo CPT utilizando impressão 3D

O dispositivo CPT foi construído utilizando uma impressora modelo Prusa I3 Rework com uma cabeça de impressão com dois bicos de saída de filamento com diâmetros de 0,6 mm. A espessura da camada impressa foi mantida em 200 μm , a mesma espessura adotada para as impressões anteriores, minimizando a ocorrência de lacunas de ar entre as camadas impressas (GOULAS *et al.*, 2020). Para o fatiamento e geração do Gcode foi utilizado o *software* PrusaSlicer 2.3.3. Foram utilizados dois tipos de filamentos, um de PLA convencional e outro com propriedades condutivas, o PLAc.

Durante os testes preliminares foram identificados dois problemas. O primeiro envolveu o uso de filamentos de PLA e PLAc com a cabeça de impressão *Diamond Hotend*. Verificou-se inicialmente que não era possível utilizar a cabeça de impressão *Diamond Hotend* em impressões que utilizassem os filamentos de PLA e PLAc. O PLAc necessita de temperaturas de extrusão na ordem de 245 °C, enquanto o PLA tem temperatura máxima de extrusão de 220 °C. Após essa temperatura, o PLA se torna excessivamente fluido prejudicando o processo de impressão com a cabeça *Diamond Hotend*. O excesso de fluidez do PLA atrapalhou a adesão na mesa e produzia retorno do material PLAc pelo duto do PLA com entupimentos constantes.

Figura 63 – Lacuna produzida por problemas de adesão entre o PLA e PLAc com velocidades de 35 mm/s de impressão.



Fonte: Próprio autor

O segundo problema foi relativo à adesão do PLAc a camada anterior já depositada de PLA. Ao se manter a velocidade de impressão padrão de 35 mm/s para

o PLA, o filamento de PLAc depositado se descolava da camada de PLA já depositada, produzindo lacunas indesejadas de ar (Figura 63). Isso ocorre devido ao fato de o PLAc ter uma menor taxa de perda de calor, mantendo-se por mais tempo aquecido. A adesão depende da formação de ligações secundárias entre o material depositado e o material da camada anterior, que ocorre após o resfriamento. Uma solução para o problema de descolamento do PLAc foi encontrada após testes com velocidade de impressão reduzida. Com a velocidade de impressão reduzida, o PLAc tem mais tempo para resfriar, promovendo maior adesão entre as partes, não produzindo lacunas entre as partes depositadas (Figura 63). A velocidade de impressão do PLAc foi ajustada para 8.75 mm/s que é uma redução de 75% em relação a velocidade de impressão do PLA. É importante ressaltar que este problema ocorreu apenas entre a adesão de camadas de PLA e PLAc. Nos testes de impressão utilizando-se apenas PLAc, não foram verificados problemas de adesão.

O padrão de preenchimento foi definido como “Rectilinear” e a densidade de preenchimento foi mantida em 100%, produzindo apenas partes sólidas nos objetos impressos. A temperatura da mesa de impressão foi mantida em 60°C, que é a temperatura padrão para trabalhos de impressão com PLA. Na base foi aplicada uma cola a base de PVP para favorecer a adesão da primeira camada na base de vidro.

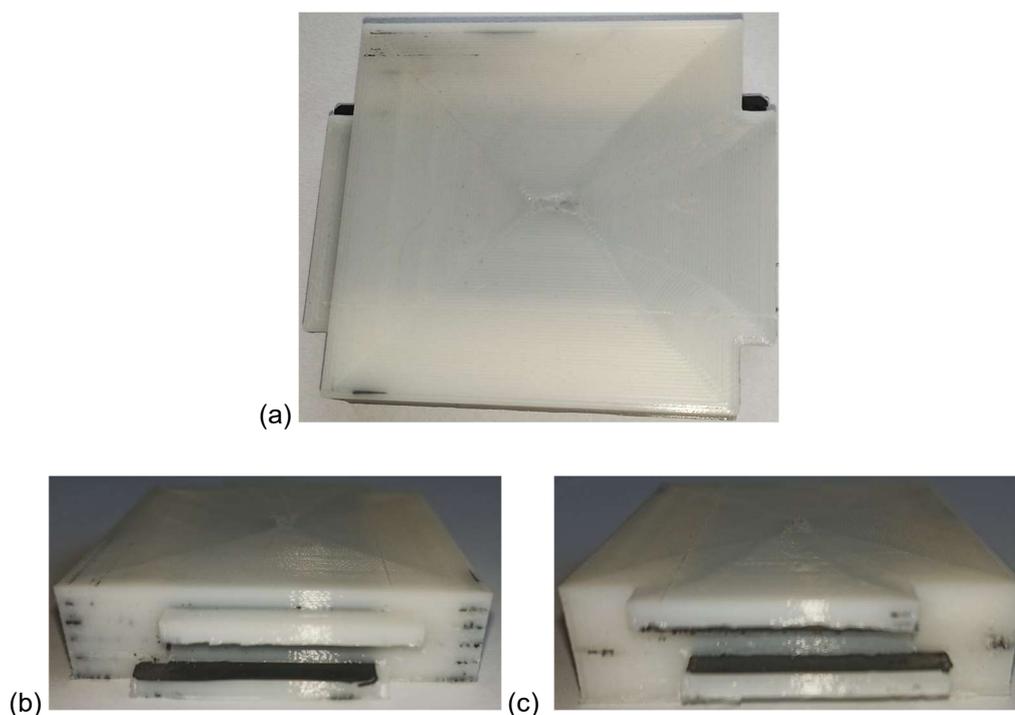
Como foi utilizada uma cabeça de impressão com dois bicos independentes, o bico com PLA foi mantido a temperatura de 220°C e o bico com PLAc foi mantido a temperatura de 245°C. Foram utilizados tracionadores convencionais para tracionar os filamentos.

O protótipo do dispositivo CPT é apresentado na Figura 64, com sua vista superior, lateral esquerda e lateral direita. Durante o processo de impressão, pequenos fragmentos de PLAc acabavam se desprendendo do bico de impressão. Isto ocorre sem existir tração do PLAc e acabam sendo depositados junto com o material de PLA, contaminando visualmente as partes brancas, que foram impressas apenas com PLA. Como o dispositivo tem tamanho inferior à mesa de impressão, pode ser impresso em um único ciclo de impressão com duração de 7 horas.

Como medida de prevenção para que a contaminação do PLAc não acabasse por produzir algum tipo de curto-circuito entre as placas, desde o início do processo de simulação foram tomadas algumas precauções de *design*. As placas condutivas não atravessam até o outro lado da peça. Existe uma lacuna de 1,5 mm preenchida com PLA convencional, evitando a exposição da placa condutiva do outro lado do

dispositivo. Isto evita que contaminações externas de PLAc acabem por produzir algum tipo de condutividade entre as placas, o que poderia prejudicar a ocorrência dos campos elétricos.

Figura 64 - Protótipo do dispositivo de CPT impresso. (a) vista superior, (b) vista lateral esquerda e (c) vista lateral direita.



Fonte: Próprio autor

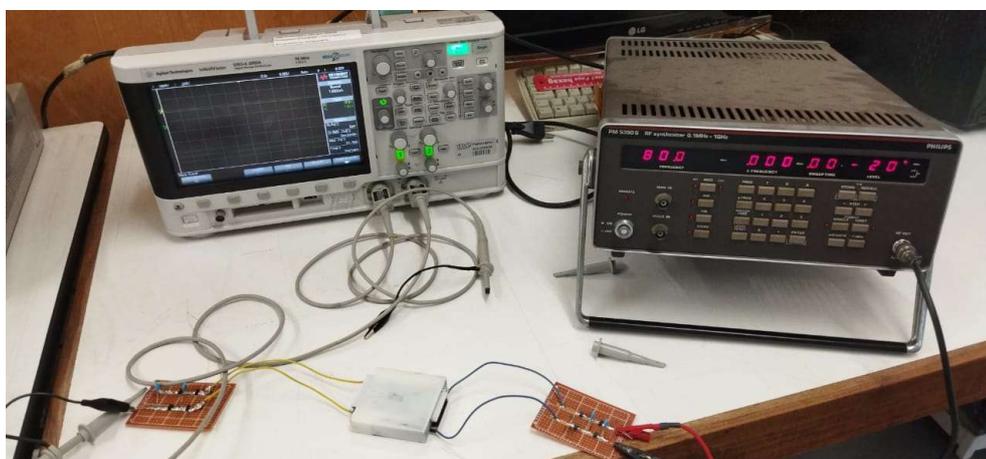
7.7 Procedimentos de medição e análise dos resultados

Para realizar as medidas do protótipo fabricado do dispositivo CPT, uma rede de compensação foi produzida para o circuito primário e outra para o circuito secundário, seguindo o esquema proposto na Figura 61c com os valores dos componentes definidos na finalização do processo de simulação eletromagnética.

Para a confecção da rede de compensação, foram utilizados capacitores cerâmicos de 220 pF e dois indutores de 22 nH ligados em paralelo para obter um indutor de 11 nH, que foi o valor obtido para os indutores durante o processo de otimização na simulação. Uma placa padrão de FR4 pré-perfurada foi utilizada como base para a construção do circuito da rede de compensação. Foram produzidas duas placas semelhantes, sendo que uma foi soldada no circuito primário do dispositivo CPT e a outra placa foi soldada no circuito secundário.

Para o processo de medição, foi utilizado um sintetizador de RF da marca Philips, modelo PM5390 S, que é capaz de produzir sinais de RF na faixa 100 KHz a 1 GHz. Para medir a tensão na entrada do circuito da rede de compensação do primário e na saída da rede de compensação do secundário, foi utilizado um Osciloscópio da marca Agilent Technologies, modelo DSO-X 2002A. O setup utilizado para leitura com as redes de compensação ligadas ao dispositivo CPT é mostrado na Figura 65.

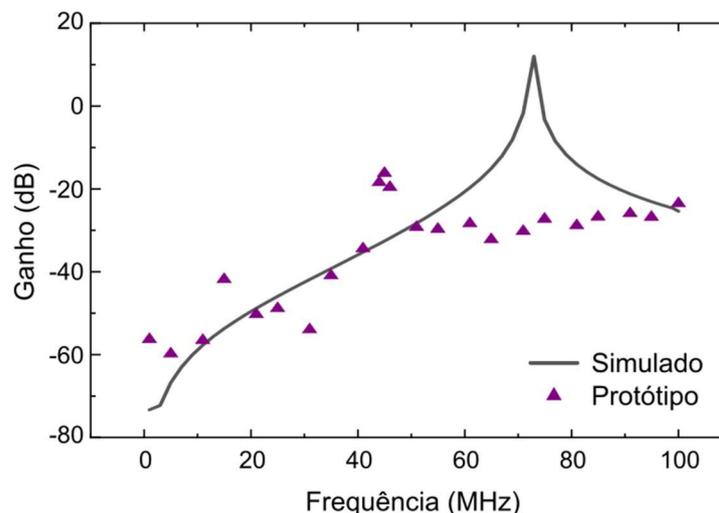
Figura 65 – Setup utilizando durante o processo de medição do protótipo do dispositivo CPT fabricado.



Fonte: Próprio autor.

Como o dispositivo CPT simulado apresentou um maior ganho em frequências próximas a 70 MHz, foram feitas varreduras entre 1 e 100 MHz em intervalos de 5 MHz. Nestas varreduras foram medidas as tensões na entrada e saída do protótipo do circuito. Como os valores de tensão obtidos com o processo de medição sofrem muita variação em função da frequência, uma análise de um gráfico da tensão em função da frequência para a entrada e saída seria muito confuso. Como forma de padronizar a interpretação dos resultados, foi conduzida uma análise do ganho da tensão de saída em relação à tensão de entrada (V_{out}/V_{in}) na escala dB ($20\log_{10}$). O mesmo critério foi adotado para a versão simulada e o resultado dessa comparação é apresentado na Figura 66.

Figura 66 – Ganho (em dB) da tensão de saída em relação a tensão de entrada para o protótipo do circuito CPT impresso e para sua versão simulada



Fonte: Próprio autor.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que houve acoplamento capacitivo entre os circuitos primário e secundário do protótipo do dispositivo CPT. A diferença de tensão entre o secundário e o primário é menor próximo a 45 MHz, com ganho de -16,2 dB para o protótipo impresso, indicando que nesta frequência ocorreu a maior transferência de energia. Isto é divergente do encontrado nas simulações, onde a maior transferência de energia ocorre próximo a 72 MHz. A partir de 50 MHz, o ganho fica estabilizado em -30 dB, indicando que a tensão na saída é em torno de 0,1% da tensão de entrada. Nas frequências abaixo de 40 MHz, apesar de existirem variações entre os valores medidos no protótipo impresso e a versão simulada, eles apresentam relações próximas de ganho.

Essa divergência nos resultados entre a versão simulada e o protótipo impresso depende de diversos fatores. Uma das possibilidades é que a contaminação do PLAc nas placas dielétricas do PLA produza alterações nos campos elétricos gerados entre as placas condutivas. Isto poderia alterar as frequências de ressonância prejudicando o ganho geral do dispositivo. Outra possibilidade estaria relacionada com a qualidade dos filamentos utilizados que podem não manter suas propriedades em toda extensão do filamento, produzindo variações nos resultados.

Apesar dos resultados divergentes, ficou comprovada a existência do acoplamento capacitivo com peças 100% produzidas através de processos de manufatura aditiva. Isto abre um novo conjunto de possibilidades em pesquisa, onde

objetos impressos por tecnologias de impressão FDM com materiais condutivos podem ser empregados na produção de campos elétricos e até mesmo magnéticos. Isto estende a abrangência de utilização dos filamentos condutivos, que anteriormente era reduzida a pesquisa de sensores e trilhas condutivas em objetos impressos. Com o desenvolvimento de novos materiais condutivos que possam ser empregados em tecnologias de impressão FDM, novos dispositivos de transferência capacitiva de energia podem ser modelados e prototipados. Com isso será possível modelar e imprimir dispositivos CPT mais eficientes.

8. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma nova técnica para a construção de dispositivos com variação dielétrica durante o processo de impressão 3D e confirmou que ela é muito precisa, pois é possível misturar qualquer quantidade de dois filamentos diferentes para influenciar as propriedades dielétricas do objeto que está sendo impresso, permitindo alterar tanto sua permissividade relativa, como sua tangente de perdas. Portanto, a técnica de mistura proposta abre novas possibilidades para o *design* a construção de circuitos de RF e micro-ondas, sejam eles passivos ou ativos.

Várias contribuições podem ser destacadas em relação à técnica proposta, com ela é possível fabricar dispositivos através de manufatura aditiva por processos de impressão 3D que permitem construir dispositivos personalizados de RF e micro-ondas com permissividade elétrica e gradientes dielétricos específicos.

A técnica difere de outras encontradas na literatura, pois produz materiais misturando filamentos com diferentes valores de permissividade elétrica relativa. Isto evita os problemas das outras técnicas de construção, que usam espaços com ar para manipular a permissividade elétrica do material. A técnica desenvolvida não produz objetos com espaços com ar, o que permite construir dispositivos com propriedades mecânicas e elétricas mais estáveis e com gradiente dielétrico a partir da resolução do equipamento. Como a técnica utiliza materiais com a mesma temperatura de fusão, evitam-se os problemas observados na literatura em que materiais diferentes podem produzir escoamento por diferenças nas suas temperaturas de fusão.

Apesar de não ter sido foco do estudo, a nova técnica permite utilizar tanto a permissividade elétrica relativa, como a perda dielétrica como parâmetro de *design* no projeto, permitindo a construção de dispositivos passivos ou ativos de micro-ondas com qualquer tipo de gradientes tanto de permissividade elétricas, como de perdas dielétricas.

Para validar a funcionalidade da técnica, foi construída uma lente dielétrica com variação espacial da permissividade. A lente planar dielétrica permitiu confirmar que a técnica é funcional, apresentando resultados muito semelhantes ao dispositivo simulado. A própria lente, apesar de ser uma prova de conceito, é uma inovação adicional, comprovando que é possível produzir mudanças no caminho da radiação eletromagnética, colimando o feixe, sem geometrias curvas ou planos inclinados.

Outros tipos de lentes podem ser desenvolvidos combinando padrões dielétricos com diferentes tipos de geometrias, permitindo combinar o ganho apresentado pela variação da permissividade com o ganho apresentado por variações geométricas.

A técnica certificou que é possível misturar filamentos e obter um gradiente dielétrico, mas a técnica não é limitada a apenas isso. Filamentos com diferentes tipos de propriedades, como permeabilidade magnética, condutividade elétrica, elasticidade ou com qualquer outra propriedade física de interesse em pesquisa também podem ser utilizados, produzindo objetos com gradientes ou variações de qualquer tipo de propriedade física de interesse, colocando essas propriedades e seus gradientes como parâmetros de *design* de projeto. Isto possibilita a produção de dispositivos e objetos mais complexos através de processos de manufatura aditivas por impressão 3D.

Também foi apresentado neste trabalho o projeto de um absorvedor que fez uso do filamento de ABSg, que é um filamento do tipo ABS com carga de carbono, na produção de absorvedores que utilizaram padrões fractais na exploração de padrões internos como parâmetros de *design*. Muitos outros parâmetros de *design* podem ser explorados e normalmente as estruturas externas são o destaque na produção de absorvedores.

A exploração das estruturas internas como parâmetro de projeto demonstrou que é possível obter-se absorvedores customizados com propriedades semelhantes ou até superiores à sua versão sólida. Com base nos fractais triangulares de Sierpiński, foi desenvolvido um absorvedor fractal de micro-ondas utilizando técnicas de manufatura aditiva, reduzindo-se a quantidade de material utilizado e consequentemente o peso do absorvedor em relação à respectiva estrutura sólida.

Ao se confirmar que as geometrias internas de um absorvedor podem ser incluídas como parâmetros de *design* e com tantos tipos de fractais e formas disponíveis, novas pesquisas podem ser desenvolvidas explorando novos tipos de padrões internos, não limitando-se apenas a fractais, tantos em absorvedores, como em qualquer tipo de dispositivo, abrindo um grande conjunto de possibilidades, indo muito além do desenvolvimento de dispositivos de RF e micro-ondas.

Ao se explorar a utilização de filamentos condutivos na produção de dispositivos utilizando-se impressão 3D, verificou-se após revisão da literatura, que não existiam trabalhos explorando a fabricação de dispositivos CPT.

Com os resultados da caracterização dos filamentos de PLA e PLAc, foi desenvolvido um modelo conceitual de como deveria ser modelado um dispositivo de transferência capacitiva de energia que utilizasse exclusivamente materiais utilizados em processos de impressão 3D. Com o modelo conceitual completo, foram feitas simulações com o objetivo de identificar a configuração que fornecesse a melhor resposta na transferência de energia. A disposição das placas condutivas na configuração PSPS apresentou o melhor resultado para um dispositivo CPT empilhado.

Foram analisadas várias configurações para a rede de compensação, sendo que para o circuito CPT proposto, uma rede de compensação multi estágios com dois circuitos LC em série de cada lado apresentou os melhores resultados nas simulações.

Com todos os parâmetros otimizados, um protótipo do circuito CPT foi impresso e a rede de compensação foi montada. Após finalizado o processo de medição da transferência de energia foi possível constatar que realmente ocorria acoplamento, ocorrendo efetivamente uma transferência de energia entre os circuitos primário e secundário.

Apesar da divergência entre os resultados da simulação e os resultados experimentais, o experimento pode ser considerado um sucesso. Com isso foi demonstrado que é possível produzir o acoplamento capacitivo com materiais e técnicas que ainda não haviam sido exploradas para esta finalidade, apresentando novas possibilidades para desenvolvimento de futuras aplicações CPT com as técnicas e materiais utilizados.

REFERÊNCIAS

- AGHAYARI, H.; NOURINIA, J.; GHOBADI, C.; MOHAMMADI, B. Realization of dielectric loaded waveguide filter with substrate integrated waveguide technique based on incorporation of two substrates with different relative permittivity. **AEU - International Journal of Electronics and Communications**, v. 86, p. 17–24, 2018.
- AHMADI, A.; MOSALLAEI, H. Physical configuration and performance modeling of all-dielectric metamaterials. **Physical Review B**, v. 77, n. 4, p. 045104, 2008.
- AL ABADI, H.; THAI, H.-T.; PATON-COLE, V.; PATEL, V. I. Elastic properties of 3D printed fibre-reinforced structures. **Composite Structures**, v. 193, p. 8–18, 2018.
- ANGUERA, J.; MARTINEZ, E.; PUENTE, C.; BORJA, C.; SOLER, J. Broad-Band Dual-Frequency Microstrip Patch Antenna With Modified Sierpinski Fractal Geometry. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 52, n. 1, p. 66–73, 2004.
- ANWAR, M. S.; ABUFANAS, H.; BANGERT, A. 3D printed dielectric lens for the gain enhancement of a broadband antenna. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, v. 30, n. 4, p. e22115, 2020.
- BACA, D.; AHMAD, R. The impact on the mechanical properties of multi-material polymers fabricated with a single mixing nozzle and multi-nozzle systems via fused deposition modeling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 9–10, p. 4509–4520, 2020.
- BOLLIG, L. M.; PATTON, M. V.; MOWRY, G. S.; NELSON-CHEESEMAN, B. B. Effects of 3-D Printed Structural Characteristics on Magnetic Properties. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 53, n. 11, p. 1–6, 2017.
- BUDMEN, I.; ROTOLO, A. **The Book on 3D Printing**. Createspace Independent Pub, 2013, 135 p.
- CASTLES, F.; ISAKOV, D.; LUI, A.; LEI, Q.; DANCER, C. E. J.; WANG, Y.; JANURUDIN, J. M.; SPELLER, S. C.; GROVENOR, C. R. M.; GRANT, P. S. Microwave dielectric characterisation of 3D-printed BaTiO₃/ABS polymer composites. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 22714, 2016.
- CATARINUCCI, L.; COLELLA, R.; COPPOLA, P.; TARRICONE, L. Microwave characterisation of polylactic acid for 3D-printed dielectrically controlled substrates. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, v. 11, n. 14, p. 1970–1976, 2017.
- CHAO LIU; HU, A. P.; COVIC, G. A.; NAIR, N.-K. C. Comparative Study of CCPT Systems With Two Different Inductor Tuning Positions. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 1, p. 294–306, 2012.
- CHEN, H.; MA, W.; HUANG, Z.; ZHANG, Y.; HUANG, Y.; CHEN, Y. Graphene-Based Materials toward Microwave and Terahertz Absorbing Stealth Technologies. **Advanced Optical Materials**, v. 7, n. 8, p. 1801318, 2019.
- CHEN, X.; LIU, H.; HU, D.; LIU, H.; MA, W. Recent advances in carbon nanotubes-

based microwave absorbing composites. **Ceramics International**, v. 47, n. 17, p. 23749–23761, 2021.

CHENG, Y.; YANG, H. Design, simulation, and measurement of metamaterial absorber. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 52, n. 4, p. 877–880, 2010.

CHO, K. W.; KIM, S. J.; KIM, J.; SONG, S. Y.; LEE, W. H.; WANG, L.; SOH, M.; LU, N.; HYEON, T.; KIM, B. S.; KIM, D. H. Large scale and integrated platform for digital mass culture of anchorage dependent cells. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 4824, 2019.

CST STUDIO SUITE. **CST Microwave Studio** 2020. Disponível em: <<https://www.cst.com/>>. Acesso em: 4 ago. 2020.

DE OLIVEIRA, A. M.; DE OLIVEIRA NETO, A. M.; PEROTONI, M. B.; NURHAYATI, N.; BAUDRAND, H.; DE CARVALHO, A.; JUSTO, J. F. A Fern Antipodal Vivaldi Antenna for Near-Field Microwave Imaging Medical Applications. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 69, n. 12, p. 8816–8829, 2021.

DE OLIVEIRA, A. M.; JUSTO, J. F.; PEROTONI, M. B.; KOFUJI, S. T.; NETO, A. G.; BUENO, R. C.; BAUDRAND, H. A high directive Koch fractal Vivaldi antenna design for medical near-field microwave imaging applications. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 59, n. 2, p. 337–346, 2017.

DE OLIVEIRA, A. M.; JUSTO, J. F.; SERRES, A. J. R.; MANHANI, M. R.; MANIÇOBA, R. H. C.; PEROTONI, M. B.; BAUDRAND, H. Ultra-directive palm tree Vivaldi antenna with 3D substrate lens for μ -biological near-field microwave reduction applications. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 61, n. 3, p. 713–719, 2019.

DE OLIVEIRA, A. M.; PEROTONI, M. B.; KOFUJI, S. T.; JUSTO, J. F. A Palm Tree Antipodal Vivaldi Antenna With Exponential Slot Edge for Improved Radiation Pattern. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 14, p. 1334–1337, 2015.

DE OLIVEIRA NETO, A. M.; BECCARO, W.; DE OLIVEIRA, A. M.; JUSTO, J. F. Exploring the internal patterns in the design of ultrawideband microwave absorbers. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, p. 1–5, 2023a.

DE OLIVEIRA NETO, A. M.; JUSTO, J. F.; BECCARO, W.; DE OLIVEIRA, A. M. Designing and building radio frequency devices with tailored dielectric properties using additive manufacturing. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 65, n. 3, p. 777–784, 2023b.

DE OLIVEIRA NETO, A. M.; SCHREINER, W. H.; JUSTO, J. F.; DE OLIVEIRA, A. M.; RANGEL, E. C.; DURRANT, S. F. Characterization of amorphous carbon films by PECVD and plasma ion implantation: The role of fluorine and sulfur doping. **Materials Chemistry and Physics**, v. 227, p. 170–175, 2019.

DEARNLEY, R. W.; BAREL, A. R. F. A broad-band transmission line model for a rectangular microstrip antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 37, n. 1, p. 6–15, 1989.

DING, F.; CUI, Y.; GE, X.; JIN, Y.; HE, S. Ultra-broadband microwave metamaterial

absorber. **Applied Physics Letters**, v. 100, n. 10, p. 103506, 2012.

DROZDOV, A. D.; DECLAVILLE CHRISTIANSEN, J. Modeling dielectric permittivity of polymer composites at microwave frequencies. **Materials Research Bulletin**, v. 126, p. 110818, 2020.

EREL, M. Z.; BAYINDIR, K. G.; AYDEMIR, M. T.; CHAUDHARY, S. K.; GUERRERO, J. M. A Comprehensive Review on Wireless Capacitive Power Transfer Technology: Fundamentals and Applications. **IEEE Access**, v. 10, p. 3116–3143, 2022.

FALCONER, K. J.; LAMMERING, B. Fractal Properties of Generalized Sierpiński Triangles. **Fractals**, v. 06, n. 01, p. 31–41, 1998.

FELICIO, J. M.; FERNANDES, C. A.; COSTA, J. R. Complex permittivity and anisotropy measurement of 3D-printed PLA at microwaves and millimeter-waves. **22nd International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECOM)**, p. 1–6, 2016.

FLOWERS, P. F.; REYES, C.; YE, S.; KIM, M. J.; WILEY, B. J. 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament. **Additive Manufacturing**, v. 18, p. 156–163, 2017.

GARCÍA-MARTÍNEZ, H.; ÁVILA-NAVARRO, E.; TORREGROSA-PENALVA, G.; RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, A.; BLANCO-ANGULO, C.; DE LA CASA-LILLO, M. A. Low-cost additive manufacturing techniques applied to the design of planar microwave circuits by fused deposition modeling. **Polymers**, v. 12, n. 9, p. 1946, 2020.

GHAZALI, M. I. M.; KARUPPUSWAMI, S.; KAUR, A.; CHAHAL, P. 3-D Printed Air Substrates for the Design and Fabrication of RF Components. **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, v. 7, n. 6, p. 982–989, 2017.

GOULAS, A.; ZHANG, S.; MCGHEE, J. R.; CADMAN, D. A.; WHITTOW, W. G.; VARDAXOGLU, J. C.; ENGSTRØM, D. S. Fused filament fabrication of functionally graded polymer composites with variable relative permittivity for microwave devices. **Materials and Design**, v. 193, p. 108871, 2020.

GRIFFITHS, E. R.; LEIGH, S. J. Multi-material fused deposition modelling for integration of interdigital dielectric sensors into carbon fibre composite tooling for in process cure monitoring. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 296, p. 272–277, 2019.

GUNWANT, D.; VEDRTNAM, A. Microwave absorbing properties of carbon fiber based materials: A review and prospective. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 881, p. 160572, 2021.

GUO, Y.; HOU, X.; LV, X.; BI, K.; LEI, M.; ZHOU, J. Tunable artificial microwave blackbodies based on metasurfaces. **Optics Express**, v. 25, n. 21, p. 25879, 2017.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentals of Physics**. 10. ed. Wiley, 2013, 1232 p.

HOU, T.; SONG, Y.; ELKHUIZEN, W. S.; JIANG, J.; GERAEDTS, J. M. P. 3D wireless power transfer based on 3D printed electronics. **2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)**, p. 499–505, 2018.

HUBER, E.; MIRZAEI, M.; BJORGAARD, J.; HOYACK, M.; NOGHANIAN, S.; CHANG, I. Dielectric property measurement of PLA. **2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)**, p. 0788–0792, 2016.

ISAKOV, D. V.; LEI, Q.; CASTLES, F.; STEVENS, C. J.; GROVENOR, C. R. M.; GRANT, P. S. 3D printed anisotropic dielectric composite with meta-material features. **Materials & Design**, v. 93, p. 423–430, 2016.

JAYAMANI, E.; NAIR, G. A.; SOON, K. H. Investigation of the dielectric properties of natural fibre and conductive filler reinforced polymer composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 162–171, 2020.

JIANG, W.; YAN, L.; MA, H.; FAN, Y.; WANG, J.; FENG, M.; QU, S. Electromagnetic wave absorption and compressive behavior of a three-dimensional metamaterial absorber based on 3D printed honeycomb. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 4817, 2018.

JILANI, M. T.; REHMAN, M. Z. ur; KHAN, A. M.; KHAN, M. T.; ALI, S. M. A brief review of measuring techniques for characterization of dielectric materials. **International Journal of Information Technology and Electrical Engineering**, v. 1, n. 1, p. 1–5, 2012.

JOSEPH, P. J.; TYSON, A. D.; BURNSIDE, W. D. An absorber tip diffraction coefficient. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 36, n. 4, p. 372–379, 1994.

JUNG, C. F.; DE JESUS PACHECO, D. A.; SPORKET, F.; DO NASCIMENTO, C. A.; TEN CATEN, C. S. Product design from waste: A novel eco-efficient pyramidal microwave absorber using rice husks and medium density fibreboard residues. **Waste Management**, v. 119, p. 91–100, 2021.

KALAŠ, D.; ŠÍMA, K.; KADLEC, P.; POLANSKÝ, R.; SOUKUP, R.; ŘEBOUN, J.; HAMÁČEK, A. FFF 3D printing in electronic applications: Dielectric and thermal properties of selected polymers. **Polymers**, v. 13, n. 21, p. 3702, 2021.

KHATRI, B.; LAPPE, K.; HABEDANK, M.; MUELLER, T.; MEGNIN, C.; HANEMANN, T. Fused Deposition Modeling of ABS-Barium Titanate Composites: A Simple Route towards Tailored Dielectric Devices. **Polymers**, v. 10, n. 6, p. 666, 2018.

KIM, J.; HAN, K.; HAHN, J. W. Selective dual-band metamaterial perfect absorber for infrared stealth technology. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 6740, 2017.

KODEESWARAN, S.; NANDHINI GAYATHRI, M. Performance Investigation of Capacitive Wireless Charging Topologies for Electric Vehicles. **2021 International Conference on Innovative Trends in Information Technology (ICITIIT)**, p. 1–6, 2021.

KUMAR, A.; SINHA, S.; SEPAHVAND, A.; AFRIDI, K. K. Improved Design

Optimization for High-Efficiency Matching Networks. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 33, n. 1, p. 37–50, 2018.

KURODA, S.; IMURA, T. Derivation and Comparison of Efficiency and Power in Non-resonant and Resonant Circuit of Capacitive Power Transfer. **2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)**, p. 152–157, 2020.

LÄTTI, K. P.; KETTUNEN, M.; STROM, J. P.; SILVENTOINEN, P. A review of microstrip T-resonator method in determining the dielectric properties of printed circuit board materials. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 56, n. 5, p. 1845–1850, 2007.

LAZARUS, N.; TSANG, H. H. 3-D Printing Structural Electronics With Conductive Filaments. **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, v. 10, n. 12, p. 1965–1972, 2020.

LECLUYSE, C.; MINNAERT, B.; KLEEMANN, M. A Review of the Current State of Technology of Capacitive Wireless Power Transfer. **Energies**, v. 14, n. 18, p. 5862, 2021.

LEIGH, S. J.; BRADLEY, R. J.; PURSSELL, C. P.; BILLSON, D. R.; HUTCHINS, D. A. A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors. **PLoS ONE**, v. 7, n. 11, p. e49365, 2012.

LI, L.; WANG, J.; WANG, J.; MA, H.; DU, H.; ZHANG, J.; QU, S.; XU, Z. Reconfigurable all-dielectric metamaterial frequency selective surface based on high-permittivity ceramics. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 24178, 2016.

LI, X. R.; LIU, Z.; LI, W. D.; SUN, G. Y.; XUE, J. Y.; WANG, C.; ZHANG, G. J. 3D printing fabrication of conductivity non-uniform insulator for surface flashover mitigation. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 26, n. 4, p. 1172–1180, 2019.

LIU, Y.; ZHANG, X. Metamaterials: a new frontier of science and technology. **Chemical Society Reviews**, v. 40, n. 5, p. 2494, 2011.

LLESHI, X.; GRELOT, R.; VAN HOANG, T. Q.; LOISEAUX, B.; LIPPENS, D. Wideband Metal-Dielectric Multilayer Microwave Absorber based on a Single Step FDM Process. **2019 49th European Microwave Conference (EuMC)**, p. 678–681, 2019.

LLESHI, X.; VAN HOANG, T. Q.; LOISEAUX, B.; LIPPENS, D. Design and Full Characterization of a 3-D-Printed Hyperbolic Pyramidal Wideband Microwave Absorber. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 20, n. 1, p. 28–32, 2021.

LU, F.; ZHANG, H.; HOFMANN, H.; MI, C. C. A Double-Sided LC-Compensation Circuit for Loosely Coupled Capacitive Power Transfer. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 33, n. 2, p. 1633–1643, 2018.

LU, F.; ZHANG, H.; MI, C. A Review on the Recent Development of Capacitive

Wireless Power Transfer Technology. **Energies**, v. 10, n. 11, p. 1752, 2017.

MARQUEZ-SEGURA, E.; SHIN, S.-H.; DAWOOD, A.; RIDLER, N. M.; LUCYSZYN, S. Microwave Characterization of Conductive PLA and Its Application to a 12 to 18 GHz 3-D Printed Rotary Vane Attenuator. **IEEE Access**, v. 9, p. 84327–84343, 2021.

MEI, Z. L.; BAI, J.; CUI, T. J. Gradient index metamaterials realized by drilling hole arrays. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 43, n. 5, p. 055404, 2010.

MOON, J. High-frequency capacitive wireless power transfer technologies. **Journal of Power Electronics**, v. 21, n. 8, p. 1243–1257, 2021.

MOSCATO, S.; BAHR, R.; LE, T.; PASIAN, M.; BOZZI, M.; PERREGRINI, L.; TENTZERIS, M. M. Infill-Dependent 3-D-Printed Material Based on NinjaFlex Filament for Antenna Applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 15, p. 1506–1509, 2016.

NEO, C. P.; VARADAN, V. K. Optimization of Carbon Fiber Composite for Microwave Absorber. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 46, n. 1, p. 102–106, 2004.

NOLDEN, R.; ZÖLL, K.; SCHWARZ-PFEIFFER, A. Development of Flexible and Functional Sequins Using Subtractive Technology and 3D Printing for Embroidered Wearable Textile Applications. **Materials**, v. 14, n. 10, p. 2633, 2021.

NURHAYATI, N.; DE OLIVEIRA, A. M.; JUSTO, J. F.; SETIJADI, E.; SUKOCO, B. E.; ENDRYANSYAH, E. Palm tree coplanar Vivaldi antenna for near field radar application. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 62, n. 2, p. 964–974, 2020.

PASCALE, D.; SIMION, I. Multi-Material 3D Printer Extruder Concept. **Journal of Industrial Design and Engineering Graphics**, v. 13, n. 1, p. 25–28, 2018.

PENTEK, A.; NYITRAI, M.; SCHIFFER, A.; ABRAHAM, H.; BENE, M.; MOLNAR, E.; TOLD, R.; MAROTI, P. The Effect of Printing Parameters on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of PLA and ABS Based Carbon Composites in Additive Manufacturing of Upper Limb Prosthetics. **Crystals**, v. 10, n. 5, p. 398, 2020.

PERKAMPUS, H.-H. **UV-VIS Spectroscopy and its Applications**. Springer Science & Business Media, 2013, 244p.

PETROFF, M.; APPEL, J.; ROSTEM, K.; BENNETT, C. L.; EIMER, J.; MARRIAGE, T.; RAMIREZ, J.; WOLLACK, E. J. A 3D-printed broadband millimeter wave absorber. **Review of Scientific Instruments**, v. 90, n. 2, p. 024701, 2019.

PEYMANFAR, R.; MIRKHAN, A. Biomass-derived materials: Promising, affordable, capable, simple, and lightweight microwave absorbing structures. **Chemical Engineering Journal**, v. 446, p. 136903, 2022.

PRUSA, J. **Prusa i3 Rework**. Disponível em: <https://reprap.org/wiki/Prusa_i3_Rework_Introduction>. Acesso em: 28 jun. 2023.

QU, S.; HOU, Y.; SHENG, P. Conceptual-based design of an ultrabroadband microwave metamaterial absorber. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 118, n. 36, 2021.

RALCHEV, M.; MATEEV, V.; MARINOVA, I. Magnetic Properties of FFF/FDM 3D Printed Magnetic Material. **2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)**, p. 1–5, 2021.

REN, J.; YIN, J. 3D-Printed Low-Cost Dielectric-Resonator-Based Ultra-Broadband Microwave Absorber Using Carbon-Loaded Acrylonitrile Butadiene Styrene Polymer. **Materials**, v. 11, n. 7, p. 1249, 2018.

SEDEHI, R.; BUDGETT, D.; JIANG, J.; ZIYI, X.; DAI, X.; HU, A. P.; MCCORMICK, D. A Wireless Power Method for Deeply Implanted Biomedical Devices via Capacitively Coupled Conductive Power Transfer. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 36, n. 2, p. 1870–1882, 2021.

SHELBY, R. A.; SMITH, D. R.; SCHULTZ, S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. **Science**, v. 292, n. 5514, p. 77–79, 2001.

SILVESTRI, L.; MASSONI, E.; BOZZI, M.; PERREGRINI, L.; TOMASSONI, C.; COVES, A. A new class of SIW filters based on periodically perforated dielectric substrate. **2016 46th European Microwave Conference (EuMC)**, p. 775–778, 2016.

SINHA, S.; KUMAR, A.; AFRIDI, K. K. Improved design optimization of efficient matching networks for capacitive wireless power transfer systems. **2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**, p. 3167–3173, 2018.

SKORSKI, M. R.; ESENTHER, J. M.; AHMED, Z.; MILLER, A. E.; HARTINGS, M. R. The chemical, mechanical, and physical properties of 3D printed materials composed of TiO₂-ABS nanocomposites. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 17, n. 1, p. 89–97, 2016.

SODAGAR, A. M.; AMIRI, P. Capacitive coupling for power and data telemetry to implantable biomedical microsystems. **2009 4th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering**, p. 411–414, 2009.

STEFANO, J. S.; GUTERRES E SILVA, L. R.; ROCHA, R. G.; BRAZACA, L. C.; RICHTER, E. M.; ABARZA MUÑOZ, R. A.; JANEGITZ, B. C. New conductive filament ready-to-use for 3D-printing electrochemical (bio)sensors: Towards the detection of SARS-CoV-2. **Analytica Chimica Acta**, v. 1191, p. 339372, 2022.

STENISHCHEV, I. v.; BASHARIN, A. A. Toroidal response in all-dielectric metamaterials based on water. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 9468, 2017.

TAK, J.; CHOI, J. A Wearable Metamaterial Microwave Absorber. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 16, p. 784–787, 2017.

UJFALUSI, Z.; PENTEK, A.; TOLD, R.; SCHIFFER, A.; NYITRAI, M.; MAROTI, P. Detailed Thermal Characterization of Acrylonitrile Butadiene Styrene and Polylactic Acid Based Carbon Composites Used in Additive Manufacturing. **Polymers**, v. 12, n. 12, p. 2960, 2020.

VIDAKIS, N.; PETOUSIS, M.; SAVVAKIS, K.; MANIADI, A.; KOUDOUMAS, E. A comprehensive investigation of the mechanical behavior and the dielectrics of pure polylactic acid (PLA) and PLA with graphene (GnP) in fused deposition modeling (FDM). **International Journal of Plastics Technology**, v. 23, n. 2, p. 195–206, 2019.

WICKRAMASINGHE, S.; DO, T.; TRAN, P. FDM-Based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. **Polymers**, v. 12, n. 7, p. 1–42, 2020.

YAHIAOUI, R.; CHUNG, U.-C.; ELISSALDE, C.; MAGLIONE, M.; VIGNERAS, V.; MOUNAIX, P. Towards left-handed metamaterials using single-size dielectric resonators: The case of TiO_2 -disks at millimeter wavelengths. **Applied Physics Letters**, v. 101, n. 4, p. 042909, 2012.

YANG, E.; YANG, F.; PEI, J.; ZHANG, X.; LIU, S.; DENG, Y. All-dielectric ultra-broadband metamaterial absorber based on imidazole ionic liquids. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 52, n. 39, p. 395501, 2019.

YAO, H.; YANG, J.; LI, H.; XU, J.; BI, K. Optimal design of multilayer radar absorbing materials: a simulation-optimization approach. **Advanced Composites and Hybrid Materials**, v. 6, n. 1, p. 43, 2023.

YENG SENG, L.; PING JACK, S.; KOK YEOW, Y.; FWEN HOON, W.; CHIA YEW, L.; HONG SENG, G.; MALEK, F. Enhanced microwave absorption of rice husk-based pyramidal microwave absorber with different lossy base layer. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, v. 14, n. 3, p. 215–222, 2020.

YI, J.; PIAU, G. P.; DE LUSTRAC, A.; BUROKUR, S. N. Electromagnetic field tapering using all-dielectric gradient index materials. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 30661, 2016.

ZHANG, L.; LI, H. K. H.; TSE, M. S.; TAN, O. K.; CHUA, E.-K.; CHOW, C. L.; LIM, C. K.; SEE, K.-Y. Modulating and tuning relative permittivity of dielectric composites at metamaterial unit cell level for microwave applications. **Materials Research Bulletin**, v. 96, p. 164–170, 2017a.

ZHANG, S.; ARYA, R. K.; PANDEY, S.; VARDAXOGLU, Y.; WHITTOW, W.; MITTRA, R. 3D-printed planar graded index lenses. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, v. 10, n. 13, p. 1411–1419, 2016.

ZHANG, S.; VARDAXOGLU, Y.; WHITTOW, W.; MITTRA, R. 3D-printed graded index lens for RF applications. **ISAP 2016 - International Symposium on Antennas and Propagation**, p. 90–91, 2017b.

APÊNDICE A - PROPOSTAS DE NOVAS PESQUISAS UTILIZANDO OS FILAMENTOS E AS TÉCNICAS DESENVOLVIDAS NESTE TRABALHO

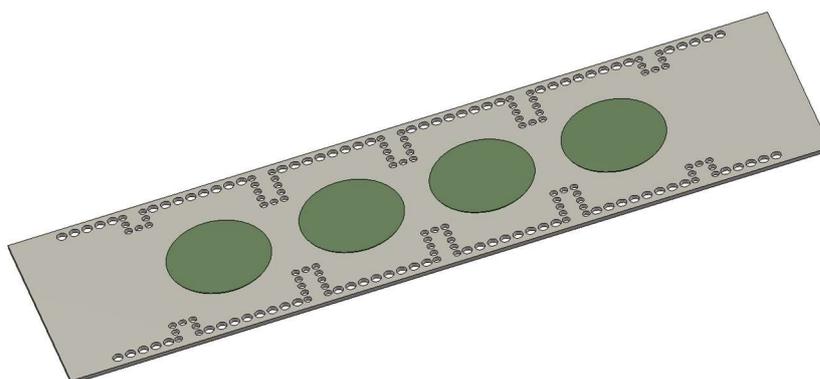
1 Possibilidades de pesquisa com a nova técnica proposta

Tendo como base a técnica de produção de objetos com permissividade elétrica variável através de impressão 3D, diversos trabalhos desenvolvidos anteriormente com a utilização de mesclagem com ar podem ser reproduzidos com o auxílio desta nova técnica. Além disso, com a pesquisa de novos materiais, outros tipos de filamentos podem ser produzidos, incluindo outras propriedades, como permissividade magnética como parâmetro de design para gradientes magnéticos.

1.1 Circuitos passivos de micro-ondas

Diversos tipos de circuitos passivos, como filtros, divisores de potência, combinadores de potência e acopladores, necessitam de substratos com valores de constantes dielétricas específicas. Estes substratos costumam ser selecionados dentre os substratos disponíveis comercialmente. O trabalho de Aghayari *et al.* explora a construção de um filtro que utiliza guia de onda integrada ao substrato.

Figura 67 - Representação esquematizada do substrato proposto por Aghayari *et al.* (2018) em seu trabalho.

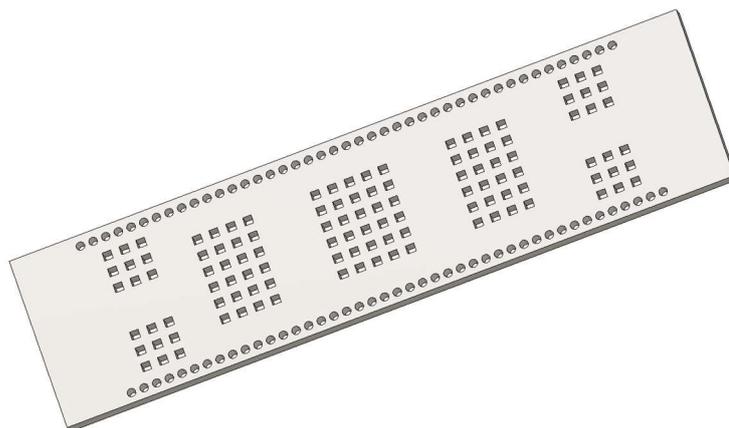


Fonte: Próprio autor

Aquele trabalho utilizou um método tradicional de fabricação, envolvendo uma ferramenta para fazer os furos da guia de onda integrada ao substrato (SIW - *Substrate Integrated Waveguide*) e 4 furos maiores no substrato principal (Figura 67) (AGHAYARI *et al.*, 2018). O substrato principal utilizava um material de ϵ_r baixo, enquanto os 4 furos maiores, foram preenchidos com o substrato de ϵ_r alto (na cor

verde). Este tipo de construção pode ser facilmente reproduzido pela técnica de produção de objetos com permissividade elétrica variável. É possível reproduzir o substrato do trabalho com apenas um único processo de impressão, reduzindo custos e tempo de preparação do filtro.

Figura 68 - Representação esquematizada do substrato proposto por Silvestri *et al.* (2016) em seu trabalho.



Fonte: Próprio autor

Já no trabalho de Silvestri *et al.* (2016) (SILVESTRI *et al.*, 2016), foi proposto um filtro de guia de onda integrada (SIW) que utiliza um substrato de ϵ_r alto e pequenos furos quadrados dentro do substrato. A Figura 68 mostra uma representação esquematizada do substrato proposto. Apesar do trabalho relacionar os pequenos furos quadrados no substrato com a alteração da impedância característica da guia de onda na região perfurada, sabe-se que a impedância depende da constante dielétrica e permeabilidade magnética da região onde os furos são feitos. Então, trata-se da técnica GRIN, com variação da permissividade elétrica por meio de pequenos furos no substrato, dispostos de forma periódica.

Já foi demonstrado que a técnica desenvolvida neste trabalho pode ser utilizada na variação da permissividade elétrica, dispensando o uso de furos, reduzindo o custo e tempo de construção deste substrato, utilizando-se de processos de manufaturas aditivas como impressoras 3D (SILVESTRI *et al.*, 2016).

Com o uso da técnica proposta neste trabalho, um substrato para circuito de micro-ondas pode ter o desenho que for mais conveniente ao pesquisador, com maior liberdade nas escolhas de formato e variação do padrão da constante dielétrica,

incluindo padrões muito mais complexos e com tempo de produção e custo bem menores.

1.2 Transições (*Tapers*)

Um dispositivo de transição eletromagnética é um objeto que controla a passagem de uma onda entre seções de diferentes dimensões. Normalmente este tipo de dispositivo é construído com variação do gradiente dielétrico utilizando furos dispostos em algum tipo de organização periódica, como o trabalho descrito por Yi *et al.* (Yi *et al.*, 2016), que utilizou uma impressora 3D para produzir um objeto com diversos furos ao longo do seu corpo, para controlar as propriedades dielétricas do objeto. Uma representação esquemática de um dispositivo de transição (*taper*) foi apresentada no capítulo 2 na Figura 2.

Os furos fornecem valores intermediários de constante dielétrica semelhantes à variação da densidade de preenchimento, já descrita no capítulo 2. A variação do gradiente dielétrico pela técnica de mistura de filamentos pode fornecer um novo método para produção destes objetos, sem a necessidade de utilização de furos, como as descritas nos estudos anteriores.

1.3 Isoladores elétricos

O isolador elétrico é utilizado quando é necessário incluir um elemento isolante entre um eletrodo e o plano terra. Alguns estudos relatam o uso de impressoras 3D para impressão de objetos isolantes, com troca de filamentos durante o processo de impressão onde são construídas duas áreas com constantes dielétricas diferentes. A Figura 69 apresenta uma representação esquematizada do isolador proposto por Li *et al.* (Li *et al.*, 2019). A figura apresenta uma região mais clara, produzida com um material de constante dielétrica mais baixa e uma região mais escura, com constante dielétrica alta. Dois tipos de isoladores foram produzidos, um utilizando filamentos de ABS com e sem carga de carbono na região escura e outro com PLA com e sem carga de grafite na região escura. O trabalho proposto Li *et al.* pode ser reproduzido pela técnica de mistura de filamentos descrita neste trabalho. Isoladores bem mais complexos podem ser produzidos, incluindo variação intermediária dos valores de constantes dielétricas e ainda aplicar gradientes dielétricos, aumentando as possibilidades de pesquisa neste campo de isoladores elétricos.

Figura 69 - Representação esquematizada do isolador elétrico proposto por Li *et al.* (2019).



Fonte: Próprio autor

1.4 Utilização de novos materiais para explorar outras propriedades físicas

A técnica proposta neste trabalho explora a mistura de materiais em impressoras 3D para a produção de objetos com características dielétricas distintas. O uso de materiais na produção de filamentos com outras propriedades físicas, como materiais com propriedades magnéticas, poderia ser utilizado para explorar gradientes magnéticos, gradientes de permissividade magnética. Como exemplo, podem-se citar trabalhos que descrevem a análise das propriedades magnéticas de objetos produzidos por impressoras 3D utilizando materiais de base polimérica com adição de pó de ferro. Os trabalhos detalharam o uso de padrões de preenchimento e da densidade de preenchimento na alteração das propriedades magnéticas dos objetos produzidos (BOLLIG *et al.*, 2017; RALCHEV; MATEEV; MARINOVA, 2021). Como a técnica de mistura de filamentos pode utilizar qualquer tipo de filamento disponível, um gradiente de permissividade magnética poderia ser produzido explorando-se o seu comportamento. Como a cabeça *Diamond HotEnd* possui três entradas para filamentos, seria possível introduzir três tipos de filamentos, um filamento com permissividade elétrica alta, outro com permissividade magnética alta e um filamento base. Com isso seria possível imprimir objetos que contenham propriedades dielétricas e magnéticas distintas ou até mesmo um gradiente utilizando propriedades magnéticas e dielétricas.

Gradientes envolvendo propriedades mecânicas também poderiam ser explorados. O trabalho de Al Abadi *et al.* detalha o comportamento de estruturas

impressas com polímeros reforçados com fibras de carbono, kevlar e vidro demonstrando como o coeficiente de elasticidade pode ser alterado em objetos impressos (AL ABADI *et al.*, 2018). Com o uso da técnica de mistura de filamentos, podem-se produzir objetos que apresentem um gradiente de coeficientes de elasticidade ou ainda objetos com coeficientes de elasticidade personalizados.

A exploração de novos materiais ou uso de filamentos com propriedades magnéticas também poderia ser aplicado ao desenvolvimento de novos tipos de absorvedores. Materiais com propriedades mistas dielétricas e magnéticas poderiam ser utilizados na produção de absorvedores, explorando as interações de novos padrões internos com materiais que exibam propriedades mistas.

Novos materiais que possam melhorar a capacidade condutiva de filamentos poderiam levar a produção de dispositivos CPT melhores. Isto levaria à produção de dispositivos CPT customizados, abrindo novas propostas de pesquisa neste segmento.

APÊNDICE B - TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE A EXECUÇÃO DESTA PESQUISA

Artigos indexados:

de Oliveira Neto, A. M.; Schreiner, W. H.; Justo, J. F.; Oliveira, A. M.; Rangel, E. C. Durrant, S. F. Characterization of amorphous carbon films by PECVD and plasma ion implantation: The role of fluorine and sulfur doping, **Materials Chemistry and Physics**, vol. 227, pp. 170-175, 2019. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.02.008.

Figueiredo, R. E.; Oliveira, A. M.; de Oliveira Neto, A. M.; Serres, A. J. R.; Alexandria, A. R.; Justo, J. F.; Perotoni, M. B.; Nurhayati, N.; Nogueira, I. C. Vivaldi Antipodal Antenna with High Gain and Reduced Side Lobe Level Using Slot Edge with New Neogothic Fractal by Cantor with Application in Medical Images for Tumor Detection, **Indonesian Journal of Electrical and Electronics Engineering**, vol. 3, n. 1, pp. 25-31, 2020. DOI: 10.26740/inajejee.v3n1.p25-31.

Oliveira, A. M.; de Oliveira Neto, A. M.; Perotoni, M. B.; Nurhayati, N.; Baudrand, H.; Carvalho, A.; Justo, J. F.; A Fern Antipodal Vivaldi Antenna for Near-Field Microwave Imaging Medical Applications, **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, vol. 69, pp. 8816-8829, 2021. DOI: 10.1109/TAP.2021.3096942.

de Oliveira Neto, A. M.; Justo, J. F.; Beccaro, W.; Oliveira, A. M.; Designing and building radio frequency devices with tailored dielectric properties using additive manufacturing, **Microwave and Optical Technology Letters**, vol. 65, pp. 777-784, 2023. DOI: 10.1002/mop.33571.

de Oliveira Neto, A. M.; Beccaro, W.; Oliveira, A. M.; Justo, J. F.; Exploring the internal patterns in the design of ultrawideband microwave absorbers, **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, pp. 1-5, 2023. DOI: 10.1109/LAWP.2023.3284650.

Outras publicações:

Nurhayati, N.; Oliveira, A. M.; de Oliveira Neto, A. M.; Figueiredo, R. E.; Pinto, M. A. B.; Justo, J. F.; Iskandarianto, F. A.; Fukusako, T.; Comparison Study of Hilbert Sierpinski and Koch Fractal Structure on Coplanar Vivaldi Antenna for L/S band Application, **2020 Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)**, pp:1-5, 2020, DOI: 10.1109/ICVEE50212.2020.9243266.

Figueiredo, R. E.; Oliveira, A. M.; Nurhayati, N.; de Oliveira Neto, A. M.; Nogueira, I. C.; Justo, J. F.; Perotoni, M. B.; Carvalho, A.; A Vivaldi Antenna Palm Tree Class with Koch Square Fractal Slot Edge for Near-Field Microwave Biomedical Imaging Applications, **2020 Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)**, pp. 1-6, 2020. DOI: 10.1109/ICVEE50212.2020.9243220.

Oliveira, A. M.; de Oliveira Neto, A. M.; Figueiredo, R. E.; Justo, J. F.; Eletromagnetismo Aplicado - 2ª Edição, **Clube dos autores**, 2023. ISBN: 9786500721355.

APÊNDICE C - OPERAÇÃO DE IMPRESSORAS 3D QUE TRABALHAM COM MISTURAS DE FILAMENTOS

Para uma impressora 3D trabalhar com mistura de filamentos, é necessário que o *firmware* (programa interno que controla o funcionamento da impressora 3D) seja customizado para essa finalidade.

A customização do *firmware* adiciona novos comandos Gcode, que permitem o controle de dois ou mais tracionadores de forma simultânea durante o processo de impressão. O controle simultâneo dos tracionadores é necessário para que a cabeça de impressão possa trabalhar executando a mistura de filamentos.

Quando a mistura de filamentos está disponível no *firmware*, duas formas de misturas de filamentos ficam disponíveis no *firmware* da impressora 3D. A primeira opção disponível é o comando Gcode M165. O comando M165 é utilizado durante o processo de impressão para ajustar os fatores de misturas e pode receber até 6 valores em ponto flutuante. Cada valor é um fator de mistura associado a uma das entradas de filamentos. Ao encontrar este comando Gcode, a impressora recalcula sua tabela interna de fatores de misturas com base na soma das proporções e estabelece novos parâmetros de tração, produzindo a nova mistura na saída do bico de impressão.

A outra forma de se trabalhar com mistura de filamentos é o uso de ferramentas virtuais. Cada entrada de filamento da cabeça de impressão é identificada como uma ferramenta física de extrusão e pode-se tracionar individualmente a ferramenta 0, 1 ou 2 (a numeração das ferramentas começa pelo 0). Isto faz com que apenas um filamento aquecido flua pela saída do bico da impressora. Utilizando-se os comandos Gcode apropriados (M163 e M164), pode-se configurar uma ferramenta de extrusão virtual. O comando M163 é utilizado para ajustar o fator de mistura de cada ferramenta de extrusão física. Para salvar os fatores de mistura em uma ferramenta de extrusão virtual, utiliza-se o comando M164. Ao se solicitar o uso de uma extrusora virtual, o *firmware* da impressora irá calcular os valores de tração para cada ferramenta de extrusão física com base nos fatores da mistura salvos em sua memória. Na maioria dos programas de fatiamento, existe a opção de se incluir comandos Gcode no início da impressão, sendo o local ideal para incluir os comandos M163 e M164 necessários para se criar as ferramentas de extrusão virtuais.