



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCOS GABRIEL FERNANDES DOS SANTOS

**USO DE MATERIAIS ELETROCERÂMICOS MULTIFÁSICOS EM ANTENA
RESSONADORA DIELÉTRICA MULTIFUNCIONAL: SIMULAÇÃO E
IMPLEMENTAÇÃO**

DM 13/2025
BELÉM - PA
2025

MARCOS GABRIEL FERNANDES DOS SANTOS

**USO DE MATERIAIS ELETROCERÂMICOS MULTIFÁSICOS EM ANTENA
RESSONADORA DIELÉTRICA MULTIFUNCIONAL: SIMULAÇÃO E
IMPLEMENTAÇÃO**

Trabalho de Dissertação de Mestrado apresentado para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa

Coorientador: Prof. Dr. Waldomiro Gomes Paschoal Júnior

DM 13/2025

BELÉM - PA

2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S237u Santos, Marcos Gabriel Fernandes dos.
 Uso de materiais eletrocerâmicos multifásicos em antena
 ressonadora dielétrica multifuncional: simulação e implementação /
 Marcos Gabriel Fernandes dos Santos, . — 2025.
 72 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
 Coorientador(a): Prof. Dr. Waldomiro Paschoal Jr.
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
 Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Elétrica, Belém, 2025.

 1. Compósitos poliméricos-cerâmicos. 2. Simulação
 eletromagnética. 3. Antenas ressonadoras dielétricas. 4.
 Modelagem computacional. 5. 5G. I. Título.

CDD 621.3

MARCOS GABRIEL FERNANDES DOS SANTOS

**USO DE MATERIAIS ELETROCERÂMICOS MULTIFÁSICOS EM ANTENA
RESSONADORA DIELÉTRICA MULTIFUNCIONAL: SIMULAÇÃO E
IMPLEMENTAÇÃO**

Trabalho de Dissertação de Mestrado orientado pelo Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa e coorientado pelo Prof. Dr. Waldomiro Gomes Paschoal Júnior, apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, para obtenção de grau de mestre em Engenharia Elétrica.

Data da Defesa: 06 de junho de 2025

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
PPGEE - UFPA
Orientador

Prof. Dr. Waldomiro Gomes Paschoal Júnior
ICEN - UFPA
Coorientador

Prof. Dr. Jordan Del Nero
PPGEE - UFPA
Avaliador Interno

Prof. Dr. Lélis Araújo de Oliveira
IFPA
Avaliador Externo

Dedico aos meus pais e minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus. Aos meus pais, pelo apoio incondicional, tanto pessoal quanto financeiro. Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Costa, e ao coorientador, Prof. Dr. Waldomiro Paschoal Júnior, pela constante orientação e valiosa contribuição técnico-científica.

Aos amigos e professores que, direta ou indiretamente, disponibilizaram seu tempo e conhecimento, contribuindo para a realização deste trabalho, deixo aqui minha sincera gratidão.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ainda ninguém pensou
sobre aquilo que todo mundo vê.”
(Arthur Schopenhauer)*

RESUMO

Esta dissertação propõe uma investigação sobre o papel de alguns materiais Compósitos poliméricos-cerâmicos e eletrocerâmicos em antenas ressonadoras dielétricas (DRA). Utilizando uma abordagem integrada de simulação computacional, o estudo visa avaliar a resposta e os resultados desses materiais como subcomponentes essenciais das antenas DRA. *Softwares* eletromagnéticos serão empregados para a avaliação desses materiais, priorizando desempenho, viabilidade e aplicação. A metodologia inclui fases de avaliação computacional, na qual os materiais serão implementados em bibliotecas de *software* como modelos computacionais para simulação eletromagnética. Esses modelos buscarão emular as características reais dos materiais, garantindo uma representação fiel de seu comportamento. Espera-se que esta pesquisa forneça *insights* significativos sobre o desempenho dessas classes de materiais em antenas ressonadoras, consolidando a importância da simulação computacional na fase inicial de implementação de novos materiais para aplicações em comunicações sem fio e RF. As potenciais áreas de aplicação incluem tecnologias de comunicação sem fio como 5G e 6G, bem como em antenas, sensores e dispositivos móveis.

Palavras-chave: Compósitos poliméricos-cerâmicos, Simulação eletromagnética, Antenas ressonadoras dielétricas, Modelagem computacional e 6G.

ABSTRACT

This dissertation proposes an investigation into the role of some polymer-ceramic and electroceramic composite materials in dielectric resonator antennas (DRA). Using an integrated computational simulation approach, the study aims to evaluate the response and results of these materials as essential subcomponents of DRA antennas. Electromagnetic software will be used to evaluate these materials, prioritizing performance, feasibility and application. The methodology includes computational evaluation phases, in which the materials will be implemented in software libraries as computational models for electromagnetic simulation. These models will seek to emulate the real characteristics of the materials, ensuring a faithful representation of their behavior. It is expected that this research will provide significant insights into the performance of these classes of materials in resonator antennas, consolidating the importance of computational simulation in the initial phase of implementation of new materials for applications in wireless communications and RF. Potential application areas include wireless communication technologies such as 5G and 6G, as well as antennas, sensors and mobile devices.

Keywords: Polymer-ceramic composites, Electromagnetic simulation, Dielectric resonator antennas, Computational modeling and 6G.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Antena ressonadora dielétrica e subcomponentes (Autor, 2025). . . .	26
Figura 2 – Ilustração do modelo de alimentação para a antena (Autor, 2025). . .	28
Figura 3 – Diagrama de radiação normalizado em 3D, componentes do campo elétrico (Adaptado de [22]).	30
Figura 4 – Representação molecular de algumas resinas epóxi (Adaptado de [39]).	35
Figura 5 – Representação molecular de alguns endurecedores (reticuladores) (Adaptado de [39]).	35
Figura 6 – Representação molecular do TiO ₂ fase cristalina Anatase (Autor, 2025).	36
Figura 7 – Representação molecular do TiO ₂ fase cristalina Brookita (Autor, 2025).	37
Figura 8 – Representação molecular do TiO ₂ fase cristalina Rutilo (Autor, 2025).	37
Figura 9 – Representação/Esquematização molecular do Compósito polimérico-cerâmico (autor, 2025).	39
Figura 10 – Exemplificação do compósito reticulado com matriz EP e reforço de TiO ₂ . (Autor, 2025).	44
Figura 11 – Valores de ϵ_r em função da % de carga TiO ₂ (Rutilo) no Compósito (Autor, 2025).	47
Figura 12 – Variação dos modelos em função da Carga em <i>range</i> (Autor, 2025). .	47
Figura 13 – Parâmetros e design do modelo de antena (Autor, 2025).	48
Figura 14 – Coeficiente de reflexão para antena, frequência e BW (Autor, 2025). .	50
Figura 15 – Reflexão de ondas em antena (VSWR) (Autor, 2025).	51
Figura 16 – Padrão de radiação, indicação de emissão direcional com lóbulo frontal mais evidente (relação F/B) para antena com LMP (Autor, 2025).	52
Figura 17 – Padrão de radiação, exemplificação do padrão de emissão de sinal da antena para os dois materiais, EP/TiO ₂ (Anatase, Brookita e Rutilo) (a), (b) e (c) respectivamente e Fosfato LMP (d) (Autor, 2025).	53
Figura 18 – Gráfico de Smirt para o Compósito EP/TiO ₂ (Rutilo) e o Fosfato LMP, casamento de impedâncias e comparativos (Autor, 2025).	54
Figura 19 – <i>Range</i> de valores operacionais da antena com Compósito EP/TiO ₂ (Rutilo) (Autor, 2025).	55
Figura 20 – Aplicações da antena (Adaptado de [71, 72, 73]).	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros gerais de desempenho da antena.	31
Tabela 2 – Componentes do campo elétrico da antena.	32
Tabela 3 – Propriedades dielétricas da DGEBA, TEPA e resina epóxi DGEBA+TEPA	36
Tabela 4 – Propriedades dielétricas das fases cristalinas do TiO_2	38
Tabela 5 – Propriedades dielétricas dos constituintes do LMP	38
Tabela 6 – Comparação das operações de simetria do TiO_2 nas fases rutilo, anatase e brookita.	42
Tabela 7 – Blocos hierárquicos e dados fixos para o material LMP modelado no <i>software</i> HFSS.	44
Tabela 8 – Modelos teóricos, suas bases físico-matemáticas e observações gerais.	46
Tabela 9 – Parâmetros de design e suas respectivas medidas geométricas.	48
Tabela 10 – Materiais, métodos e funções no projeto.	49
Tabela 11 – Resultados e parâmetros de antena e RF para os materiais.	50
Tabela 12 – Parâmetros gerais de desempenho das antenas simuladas.	51
Tabela 13 – Valor do campo elétrico resultante por componente, com direção correspondente.	52
Tabela 14 – Aplicações avançadas para a antena proposta.	56
Tabela 15 – Comparativo de antenas e trabalhos similares.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	Primeira geração de redes móveis
2G	Segunda geração de redes móveis
3D	Três dimensões
3G	Terceira geração de redes móveis
4G	Quarta geração de redes móveis
5G	Quinta geração de redes móveis
a	Comprimento da base do substrato
b	Largura da base do substrato
CoPolar	Polarização copolarizada
d	Altura do substrato
DGEBA	Diglycidyl Ether of Bisphenol A
DETA	Dietilenotriamina
DGBF	Diglycidyl Ether of Bisphenol F
DR	Ressonador dielétrico (<i>Dielectric Resonator</i>)
DRAs	Antenas ressonadoras dielétricas (<i>Dielectric Resonator Antennas</i>)
DWM	Modo de guia de onda dielétrico (<i>Dielectric Waveguide Mode</i>)
EP	Resina Epóxi
F/B	Relação frente/costa (<i>Front-to-Back ratio</i>)
FR4-Epóxi	Material laminado epóxi reforçado com vidro
GHz	Gigahertz
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
h_{sub}	Espessura do substrato
IA	Inteligência Artificial
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
$I4_1/amd$	Grupo espacial de simetria

LMP	Fosfato de lítio e magnésio ($0,5\text{LiMgPO}_4-0,1\text{CaTiO}_3-0,4\text{K}_2\text{MoO}_4$)
L_{lst}	Comprimento da linha de alimentação secundária (<i>slot</i>)
L_{strip}	Comprimento da linha de alimentação principal
L_{sub}	Comprimento do substrato
LTE	<i>Long Term Evolution</i> (padrão 4G)
LHCP	Polarização circular à esquerda (<i>Left-Hand Circular Polarization</i>)
MEF	Método dos Elementos Finitos
MIMO	Múltiplas entradas e múltiplas saídas (<i>Multiple Input Multiple Output</i>)
MD	Dinâmica Molecular (<i>Molecular Dynamics</i>)
mmWave	Ondas milimétricas
$P4_2/mnm$	Grupo espacial de simetria
PBCA	Grupo espacial de simetria
PEC	Condutor elétrico perfeito (<i>Perfect Electric Conductor</i>)
PMC	Condutor magnético perfeito (<i>Perfect Magnetic Conductor</i>)
RK	Impedância complexa normalizada da carga (R:parte resistiva e K:parte reativa)
Rad.Box	Caixa de radiação
RDRA	Antena ressonadora dielétrica retangular
RF	Rádio Frequência
RHCP	Polarização circular à direita (<i>Right-Hand Circular Polarization</i>)
RIS	Superfícies Inteligentes Reconfigurável (<i>Reconfigurable Intelligent Surfaces</i>).
SAR	Radar de abertura sintética
SRR	Ressonador de anel dividido (<i>Split Ring Resonator</i>)
SWAA	Antena de abertura de banda larga com fenda (<i>Slotted Wideband Aperture Antenna</i>)
UWB	Banda ultralarga (<i>Ultra-Wideband</i>)

TEPA	Tetraetilenopentamina
TiO ₂	Dióxido de titânio (Anatase, Brookita ou Rutilo)
U.R.R	Unidade Repetitiva da Resina Reticulada
VSWR	Relação de onda estacionária de tensão (<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>)
W_{lst}	Largura da linha de alimentação secundária (<i>slot</i>)
W_{strip}	Largura da linha de alimentação principal
W_{sub}	Largura do substrato
AM	Modelagem Analítica
DFT	Teoria do Funcional da Densidade (<i>Density Functional Theory</i>)
PML	Condição de Limite Periódica (<i>Perfectly Matched Layer</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{E}	Campo elétrico
\vec{H}	Campo magnético
\vec{D}	Vetor deslocamento elétrico
\vec{B}	Vetor indução magnética
\vec{J}	Densidade de corrente elétrica
\vec{S}	Vetor de Poynting (densidade de potência eletromagnética)
\vec{A}	Potencial vetorial magnético
\vec{A}_\perp	Componente transversal do vetor \vec{A}
ϕ	Potencial escalar elétrico
\vec{r}, \vec{r}'	Vetores de posição e de fonte
θ, ϕ	Coordenadas angulares esféricas
r	Distância radial
x, y, z	Coordenadas cartesianas
f	Frequência de operação
ω	Frequência angular ($\omega = 2\pi f$)
k	Número de onda no meio
k_0	Número de onda no vácuo
k_d	Número de onda no dielétrico
k_x, k_y, k_z	Componentes do vetor de onda
k_{z0}	Constante relacionada ao modo de propagação
c	Velocidade da luz no vácuo
ϵ	Permissividade elétrica do meio
μ	Permeabilidade magnética do meio
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo

j	Unidade imaginária ($j^2 = -1$)
$e^{j\omega t}$	Dependência temporal harmônica
Z_0	Impedância característica do meio de entrada
Z_L	Impedância de carga
Z_c	Impedância característica da linha de alimentação
λ_0	Comprimento de onda no vácuo
λ_g	Comprimento de onda guiado
ϵ_0	Ganho máximo teórico
ϵ_c	Eficiência de acoplamento
ϵ_d	Eficiência de dissipação
ϵ_r	Constante dielétrica relativa
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
ϵ_{reff}	Permissividade elétrica efetiva
ϵ_s	Permissividade do substrato
ϵ_m	Permissividade do material matriz
ϵ_f	Permissividade do material de reforço
ϵ_{HS}^+	Permissividade do modelo de Hashin-Shtrikman superior
ϵ_{HS}^-	Permissividade do modelo de Hashin-Shtrikman inferior
ϵ_{LLL}	Permissividade do modelo de Landau-Lifshitz/Looyenga
ϵ_R	Permissividade do modelo de Rayleigh
ϵ_{CL}	Permissividade do modelo de Clausius-Mossotti
V_m	Volume do material matriz
V_f	Volume do material de reforço
n	Número de unidades moleculares no composto
m	Número de unidades moleculares no composto
R'	Grupo funcional no composto

$\tan \delta$	Perda dielétrica (dissipação de energia)
$Re(\epsilon)$	Parte real da permissividade
$Im(\epsilon)$	Parte imaginária da permissividade
$D_0(\theta, \phi)$	Direção máxima da antena
$G_0(\theta, \phi)$	Ganho máximo da antena
BW	Largura de banda
p	Relação entre altura e largura do ressonador
q	Fator de forma relacionado ao ressonador
Q	Fator de qualidade do ressonador
s	Parâmetro relacionado à largura de banda
s_1, s_2, s_3, s_4	Coefficientes de ajuste empírico
∇	Operador nabla (gradiente, divergente e rotacional)
$\nabla \cdot$	Divergente
$\nabla \times$	Rotacional
∇^2	Laplaciano

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Estado da Arte	20
1.2	Objetivos	22
1.3	Organização do Trabalho	22
2	TEORIA DE ANTENAS: ANTENAS DRA	23
2.1	Introdução	23
2.2	Teoria Eletromagnética de Antenas	23
2.2.1	Potenciais Eletromagnéticos	24
2.2.2	Campos Irrradiados por Correntes	24
2.2.3	Densidade de Potência e Potência Irrradiada	25
2.2.4	Fundamentação Eletromagnética em DRA's	25
2.2.4.1	Equação de Helmholtz no Dielétrico	25
2.2.4.2	Condições de Contorno	26
2.3	Antenas Ressonadoras Dielétricas DRA	26
2.4	Alimentação de uma DRA	28
2.5	Parâmetros de análise de antenas	29
2.5.1	Diagrama de Radiação	29
2.5.2	Ganho e Eficiência de Radiação	30
2.5.3	Fator de Qualidade	30
2.5.4	Largura de Banda de uma DRA	31
2.5.5	Coeficiente de Reflexão	31
2.5.6	Parâmetros Gerais de Desempenho de Antena	31
2.6	Projetando DRAs, Considerações finais do capítulo	32
3	TEORIA DE MATERIAIS	33
3.1	Introdução	33
3.2	Dielétricos	33
3.2.1	Permissividade	33
3.2.2	Constante Dielétrica	33
3.3	Materiais Eletrocerâmicos	34
3.3.1	Compósitos Eletrocerâmicos	34
3.3.1.1	Compósito EP/TiO ₂	34
3.3.2	Fosfato de Lítio e Magnésio (LMP)	38
3.4	Projetando Compósitos, considerações finais do capítulo	39
4	METODOLOGIA	40
4.1	Introdução	40
4.2	Materiais e suas Abordagens	40
4.3	Metadados de Simulação e entradas de <i>software</i>	40
4.3.1	TiO ₂ Fase Cristalina Anatase	40

4.3.2	TiO ₂ Fase Cristalina Brookita	41
4.3.3	TiO ₂ Fase Cristalina Rutilo	41
4.3.4	Diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA)	43
4.3.5	Tetraetilenopentamina (TEPA)	43
4.3.6	Compatibilidade	43
4.3.7	Fosfato LMP	44
4.4	Predição de permissividade/Modelo de Misturas	45
5	GEOMETRIA DA ANTENA: UM PROJETO	48
5.1	<i>Software de Simulação</i>	49
5.2	Resultados e Discussões	49
5.2.1	Multifuncionalidade	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
6.1	Conclusões	57
6.2	Propostas Futuras	58
6.3	Produções Acadêmicas Vinculadas ao Projeto	58
	Referências	59
	 APÊNDICES	 65
	APÊNDICE A – NOTA SOBRE O USO DE IA	66
	APÊNDICE B – PRÉ-CÓDIGO SIMULAÇÃO NUMÉRICA	67

1 INTRODUÇÃO

No atual cenário tecnológico, a evolução dos sistemas de comunicação sem fio (*Wireless*) continua sendo impulsionada pela demanda crescente por maior velocidade, eficiência energética e integração inteligente. Tecnologias emergentes como as redes móveis de sexta geração (6G), superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS) e a comunicação em faixas de frequência mais altas estão entre as inovações em discussão, exigem dispositivos cada vez tecnológicos e mais potentes, capazes de transmitir e receber sinais com alta precisão e eficiência [1]. Nesse contexto, o desenvolvimento e a otimização de antenas e dispositivos móveis são cruciais, mas também o estudo e implementação de materiais inovadores se faz necessário. Uma ferramenta essencial aliada nesse processo é a simulação por meio de *softwares* especializados.

A simulação computacional emergiu como uma ferramenta indispensável no desenvolvimento de uma gama de dispositivos e aplicações. *Softwares* permitem modelagens, testes e otimizações em projetos de forma virtual antes da etapa de construção de protótipos físicos, predizendo resultados e falhas [2].

Dispositivos miniaturizáveis e de fácil produção, como Antenas de Ressonância Dielétrica (DRAs), surgem como opções para integrar e viabilizar a próxima geração da comunicação sem fio. Suas características distintivas, incluindo geometria simplificada, facilidade de produção e design, utilização de diferentes classes de materiais como os dielétricos altamente permissivos, ausência de perdas por condução, dimensões compactas e baixa perda tangencial, as tornam soluções altamente viáveis além de serem de fácil aplicação em simulações e *Softwares* [3, 4].

Entre os diversos materiais aplicáveis para otimizar a performance desses dispositivos, se destacam as classes de materiais compósitos, poliméricos, cerâmicos e dielétricos. Compósitos poliméricos de resina epóxi contendo TiO_2 multifásico (anatase, brookita e rutilo) (EP/ TiO_2 (multi-fases)) exibem elevada constante dielétrica, baixa tangente de perda e excelente estabilidade térmica, agrupando diferentes propriedades advindas da matriz (fase contínua) e cargas (fases dispersas), tornando-se uma classe de material promissor para aplicações em dispositivos de micro-ondas e antenas ressonadoras dielétricas (DRA) [5]. Alguns compósitos cerâmicos multifásicos como o fosfato LiMgPO_4 (LMP), classificado como uma cerâmica dielétrica LTCC, destacam-se por sua processabilidade em baixas temperaturas e compatibilidade com antenas, permitindo sua aplicação em circuitos integrados de radiofrequência (RF), antenas e sensores de alta frequência [6].

Ambos os materiais possuem fases e estrutura cristalina específicas que influenciam suas propriedades dielétricas e respostas eletromagnéticas. Havendo estudos rasos sobre suas características na faixa de micro-ondas e suas potenciais aplicações em antenas e dispositivos de RF, o que exige investigações adicionais para otimizar desempenho, aplicação e viabilidade nessas frequências.

1.1 Estado da Arte

O campo de estudo de materiais, simulação e antenas está intimamente interligado e evoluiu ao longo do tempo em resposta às demandas crescentes das comunicações e demais áreas de aplicação. Inicialmente, houve avanços significativos no desenvolvimento de materiais para antenas, visando melhorar o desempenho e a eficiência dos sistemas de comunicação, aliado a isso, a simulação surgiu como opção para otimizar e avaliar essa interação.

Os sistemas sem fio começaram a despontar no final do século XIX com as primeiras transmissões de rádio [7]. Essa tecnologia evoluiu rapidamente, sendo amplamente utilizada em comunicação militar e civil [8]. Na década de 1970, surgiram os primeiros conceitos de comunicação móvel celular, culminando no lançamento dos primeiros sistemas comerciais de telefonia móvel analógica (1G).

Nos anos 1980, a primeira geração de comunicações móveis (1G), baseada em sinais analógicos, permitiu a comunicação à distância, embora com altos custos e acesso limitado. A década de 1990 viu o surgimento da segunda geração (2G), que trouxe consigo a revolução da comunicação digital. Essa tecnologia proporcionou aumento significativo na velocidade de transmissão, permitindo o envio e recebimento de mensagens de texto, *e-mails* e até mesmo imagens.

Sendo também nesse tempo que o interesse pelo uso de simulações em diversos campos, incluindo a pesquisa sobre materiais e antenas, começou a crescer. O advento da computação de alto desempenho e o desenvolvimento de *softwares* especializados de simulação possibilitaram a modelagem mais precisa e eficiente de sistemas complexos [9, 10].

Além disso, esse período marcou avanço significativo no campo do imageamento, com o desenvolvimento do radar de abertura sintética (SAR), uma tecnologia que permitiu a formação de imagens detalhadas do solo, o que foi explorado em aplicações de imageamento remoto [11]. Durante esse período, o imageamento também foi adotado para inspeções industriais, como a detecção de falhas internas em materiais e equipamentos.

Com a tecnologia de miniaturização de sistemas surgindo nos anos 2000, emergem os primeiros protótipos portáteis de imageamento e tecnologias de segurança, como *scanners* corporais em aeroportos, que passaram a usar ondas milimétricas. Na mesma década, o 3G trouxe internet de alta velocidade e chamadas de vídeo, impulsionando o uso dos *smartphones*.

Com a chegada do LTE (4G) nos anos 2010, as velocidades de transmissão aumentaram consideravelmente e as latências diminuíram, o que permitiu uma nova revolução no uso da internet móvel. O aumento no número de dispositivos conectados, no entanto, exigiu mais das infraestruturas de comunicação. A partir de 2010, com o avanço das comunicações móveis e do interesse por ondas de altíssima frequência, o

imageamento eletromagnético evoluiu para aplicações de alta resolução em drones, veículos e cidades inteligentes.

Com o crescimento exponencial do número de dispositivos conectados, a demanda por altas velocidades de transmissão e baixa latência se tornou cada vez mais crítica. Nesse contexto, surgiu a quinta geração (5G) e além (6G), prometendo revolucionar as comunicações móveis e possibilitar novas aplicações, como veículos autônomos, inteligência artificial (IA), realidade aumentada e Internet das Coisas (IoT).

Aliado ao surgimento do 1G e 2G, o uso de materiais dielétricos e diferentes classes de materiais, começou a ser explorado em 1938 por Richtmeyer [12]. No entanto, os ressonadores só se tornaram amplamente conhecidos após a utilização de materiais cerâmicos de baixas perdas, que se mostraram eficazes em aplicações em filtros e osciladores de micro-ondas.

As aplicações de antenas começaram a ser mais notadas na década de 1980, com os estudos de MCALLISTER e LONG [13, 14], que analisaram as propriedades de geometrias retangulares e circulares, uma abordagem importante para a evolução dos sistemas de antenas modernos.

Desde então, grandes avanços ocorreram nesses campos da ciência e engenharia, GAYA et al. (2019) [15] realizaram simulações de um material cerâmico de $\epsilon_r = 10$, para ondas milimétricas aplicado a antenas DRA, visando a tecnologia 5G. Eles utilizaram *Roger RT/ duroid 5880* como substrato para frequência de ressonância de 26 GHz, visando viabilidade e aplicação.

BAFROOEI et al. (2020) [16] sinterizaram um material dielétrico de composição $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ usando matéria-prima convencional, visando baixo custo. As propriedades obtidas foram $\epsilon_r = 13$ a 1375°C . Essa temperatura de fusão é próxima aos materiais LTCC, cuja principal característica é o baixo ponto de fusão, sendo uma alternativa para a produção de amostras.

ANAND et al. (2022) [17] projeta uma antena DRA do tipo MIMO com materiais dielétricos como a Alumina e Teflon visando obter resultados de largura de banda fracionada e otimização facilitada pelo uso dos materiais com baixo custo, além disso, todo processo tem pré-etapa de simulação por *software* comercial para otimização.

Quando observado o uso computacional em auxílio ao desenvolvimento, BISHARA et al. (2023) [18] mostra um *review* sobre modelagem e simulação multiescala de materiais, apresentando perspectivas sobre a área e sua importância, ou ainda YE et al. (2023) [19] que utiliza de técnicas computacionais para prever características físicas de perovskitas.

E mais recentemente, SHI et al. (2024) [20] que apresenta um substrato compósito polimérico com alta constante dielétrica e baixa perda dielétrica em formato de antena vestível composta multibanda para comunicação sem fio, aplicada ao 5g visando aplicações versáteis.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver protótipos simulados de antenas DRA e aplicar, avaliar e prever materiais para alto desempenho da aplicação, os explorando através de técnicas computacionais numéricas. Como alguns materiais podem apresentar altos custos de produção, necessidade de infraestrutura e elevada dificuldade de síntese, serão utilizados métodos numéricos para prever resultados físicos. Dessa maneira, visando a necessidade de dispositivos menores e versáteis com materiais eficientes e de alto desempenho, seja para sistemas sem fio, sensores, antenas, materiais inteligentes, o trabalho em questão aborda os seguintes objetivos:

1. Projetar e simular um modelo DRA compacto que atenda aos critérios de tecnologia, multifuncionalidade e eficiência;
2. Aplicar um modelo numérico para avaliar as características dielétricas dos materiais, projetar e implementar a simulação desses materiais como técnica funcional.
3. Avaliar os resultados e mensurar a viabilidade de aplicação de cada material como subcomponente da antena;
4. Avaliar a viabilidade e os parâmetros de análise das antenas, tais como, mas não se limitando a, eficiência de radiação, ganho e largura de banda.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizada em seis capítulos, conforme é descrito a seguir:

O Capítulo 1 contextualiza o presente trabalho, seguido por uma revisão da literatura científica relevante. Ao final do capítulo, são apresentados os objetivos e as propostas que norteiam este estudo.

O Capítulo 2 apresenta um estudo bibliográfico a respeito da teoria de antenas utilizada no trabalho, por fim os parâmetros fundamentais de antenas são também descritos em detalhes.

O Capítulo 3 apresenta a teoria de materiais, sendo detalhados alguns dos materiais ímpares na produção deste trabalho.

No Capítulo 4 é apresentado a metodologia, são discutidos os materiais e modelos que serão aplicados a simulação e *software*, alguns de seus parâmetros, informações, dados e metadados.

No Capítulo 5 são apresentados os projetos de antenas DRA, onde há o detalhamento de características e resultados das simulações acompanhadas pelos *softwares*, avaliação e viabilidade de aplicação, além das características obtidas em função dos subcomponentes e materiais aplicados.

Por fim no Capítulo 6, as conclusões retiradas a partir de todo escopo deste trabalho, incluindo sugestões para trabalhos futuros relacionados com essa linha de pesquisa envolvendo dispositivos eletrônicos e materiais inovadores e as referências.

2 TEORIA DE ANTENAS: ANTENAS DRA

2.1 Introdução

Antenas são estruturas fundamentais em sistemas de comunicação sem fio, utilizadas tanto para a propagação quanto para a recepção de ondas eletromagnéticas, realizando a conversão entre corrente elétrica e ondas eletromagnéticas, e vice-versa, permitindo a transmissão e recepção de informações. Este capítulo introduz os conceitos essenciais que sustentam o desenvolvimento do trabalho, fornecendo a base necessária para a compreensão dos tópicos abordados nos capítulos seguintes.

2.2 Teoria Eletromagnética de Antenas

A teoria eletromagnética constitui a base fundamental para a compreensão do funcionamento das antenas. A radiação eletromagnética gerada por uma antena é resultado direto da interação entre campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo, conforme descrito pelas equações de Maxwell. Estas equações governam a propagação, irradiação e distribuição dos campos no espaço.

O comportamento dos campos elétrico (\vec{E}) e magnético (\vec{H}) em um meio linear, homogêneo, isotrópico e sem perdas é descrito pelas quatro equações de Maxwell [14, 21, 22]:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

Com as relações constitutivas:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

onde ϵ é a permissividade elétrica e μ é a permeabilidade magnética do meio.

2.2.1 Potenciais Eletromagnéticos

Para resolver os campos irradiados por uma antena, é comum utilizar os potenciais escalar ϕ e vetorial \vec{A} [14, 21, 22], definidos por:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.7)$$

$$\vec{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial\vec{A}}{\partial t} \quad (2.8)$$

Assumindo o calibre de Lorenz, a condição de compatibilidade entre os potenciais é dada por:

$$\nabla \cdot \vec{A} + \mu\epsilon \frac{\partial\phi}{\partial t} = 0 \quad (2.9)$$

Sob essa condição, os potenciais satisfazem as equações de onda não homogêneas:

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} \quad (2.10)$$

$$\nabla^2 \phi - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.11)$$

Em regime harmônico, onde todas as variáveis têm dependência temporal do tipo $e^{j\omega t}$, essas equações assumem a forma da equação de Helmholtz:

$$(\nabla^2 + k^2) \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (2.12)$$

$$(\nabla^2 + k^2) \phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.13)$$

com

$$k = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad (2.14)$$

onde k é o número de onda, ω é a frequência angular, μ é a permeabilidade magnética e ϵ é a permissividade elétrica do meio.

2.2.2 Campos Irrradiados por Correntes

A solução da equação de Helmholtz para o potencial vetorial \vec{A} , gerado por uma densidade de corrente $\vec{J}(\vec{r}')$, é dada por [14, 21, 22]:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}(\vec{r}') e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dV' \quad (2.15)$$

No campo distante ($r \gg \lambda$), os campos elétrico e magnético podem ser aproximados por:

$$\vec{E} \approx j\omega \vec{A}_\perp \quad (2.16)$$

$$\vec{H} \approx \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (2.17)$$

onde \vec{A}_\perp representa a componente transversal de \vec{A} em relação à direção de propagação (radial).

2.2.3 Densidade de Potência e Potência Irradiada

A densidade de potência média no regime harmônico é dada pelo vetor de Poynting médio [14, 21, 22]:

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \Re(\vec{E} \times \vec{H}^*) \quad (2.18)$$

A potência total irradiada pela antena é obtida pela integração do módulo da densidade de potência média sobre uma superfície esférica no infinito:

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |\vec{S}(r, \theta, \phi)| r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.19)$$

2.2.4 Fundamentação Eletromagnética em DRA's

A operação da antena ressoadora dielétrica (DRA) pode ser compreendida como a excitação de modos naturais de ressonância no volume do dielétrico, que então acoplam energia ao espaço livre por meio de descontinuidades físicas ou efeitos de franja. O ressonador pode ser modelado como uma cavidade aberta, cujos modos são determinados pelas dimensões físicas e propriedades do material [14, 21, 22]. Para estimar a frequência desses modos, considera-se o DRA como uma cavidade inserida em um guia de ondas com paredes PEC (superior e inferior) e PMC (laterais), o que aproxima bem os modos $TE_{y_{mnp}}$ de resultados experimentais [13]. Com base nesse modelo [23] é possível calcular a frequência ressonante em função das dimensões normalizadas e da permissividade do material, servindo como base inicial para o projeto da antena.

2.2.4.1 Equação de Helmholtz no Dielétrico

Assumindo um meio homogêneo, isotrópico e sem perdas, os campos elétrico e magnético no interior do ressonador satisfazem a equação de Helmholtz vetorial [14, 21, 22]:

$$(\nabla^2 + k_d^2) \vec{E} = 0 \quad (2.20)$$

$$(\nabla^2 + k_d^2) \vec{H} = 0 \quad (2.21)$$

onde o número de onda no dielétrico é dado por:

$$k_d = \omega \sqrt{\mu \epsilon_d} \quad (2.22)$$

As soluções dessas equações, sujeitas às condições de contorno nas interfaces dielétrico/ar (ou dielétrico/metal), determinam os modos ressonantes da antena. Os modos mais comuns são os modos transversais elétricos ($TE_{mn\ell}$), modos transversais magnéticos ($TM_{mn\ell}$) e modos eletromagnéticos híbridos ($HEM_{mn\ell}$) [14, 21, 22]. Em outras palavras, a DRA pode ser modelada como uma cavidade ressonante aberta, na qual apenas certos modos determinados pelas dimensões físicas e pelas propriedades do material, são suportados.

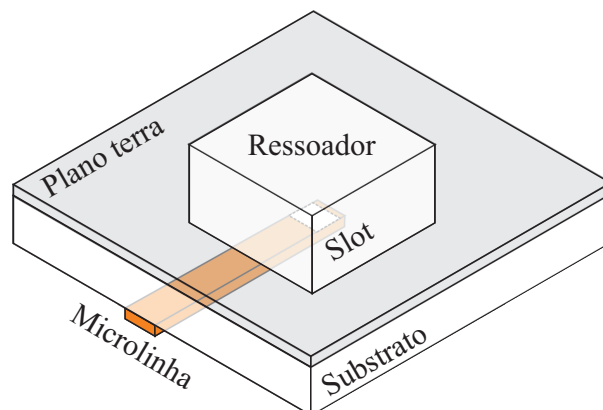
2.2.4.2 Condições de Contorno

A teoria eletromagnética impõe que, nas interfaces, certas componentes dos campos eletromagnéticos devem ser contínuas para garantir a correta propagação e acoplamento de energia. São elas a componente tangencial do campo elétrico (\vec{E}_t), a componente normal do vetor deslocamento elétrico (\vec{D}_n), a componente tangencial do campo magnético (\vec{H}_t) e a componente normal do vetor indução magnética (\vec{B}_n). Essas condições de contorno asseguram o acoplamento adequado dos campos entre a linha de alimentação, elemento ressonante e o meio externo (espaço livre) [14, 21, 22].

2.3 Antenas Ressonadoras Dielétricas DRA

Antenas de ressonador dielétrico são embasadas num ressonador dielétrico (DR) normalmente montado sobre um plano de terra metálico (aterramento) ou sobre um substrato dielétrico aterrado (Figura 1), o ressonador pode assumir qualquer forma geométrica e teoricamente produzir radiação eletromagnética sem a presença de um substrato dielétrico aterrado ou placa de base, e pode irradiar sinais para qualquer superfície, exceto o plano de aterramento [12, 21].

Figura 1 – Antena ressonadora dielétrica e subcomponentes (Autor, 2025).



Para ressonadores retangulares, os parâmetros das antenas são calculados pela Equação 2.23 que tem a Equação 2.24 por solução [12, 21]:

$$\tan(k_z d) = \frac{k_z}{\sqrt{(\varepsilon_r - 1)k_0^2 - k_z^2}} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_r k_0^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (2.24)$$

ε_r é a permissividade relativa do material ressonador, k é o número de onda em cada direção cartesiana e k_0 é o número de onda no espaço livre. PANDEY et al. (2019) [24] apresenta uma solução para o modo fundamental dada por:

$$k_x = \frac{\pi}{a}, \quad k_y = \frac{\pi}{b} \quad (2.25)$$

Que leva a:

$$k_z \tan\left(\frac{k_z d}{2}\right) = k_{z0} \quad (2.26)$$

onde $k_{z0} = \sqrt{(\varepsilon_r - 1)k_0^2 - k_z^2}$, $k_0 = \frac{\omega}{c}$, $\omega = 2\pi f$, k_z , pode ser determinado pela Equação 2.27 e, usando as relações é possível determinar a altura do ressonador através de:

$$d = \frac{2}{k_z} \tan^{-1}\left(\frac{k_{z0}}{k_z}\right) \quad (2.27)$$

Ao considerar um ressonador dielétrico (DR) dentro de um guia de ondas com paredes superiores e inferiores condutoras perfeitas (PEC) e as outras quatro paredes como condutoras magnéticas perfeitas (PMC) os resultados dos modos $TE_{y_{mnp}}$ convergem para experimentais [13]. Por análise dimensional é possível estimar os parâmetros de um DR. O método proposto é calculado pelas seguintes equações [23].

$$f = \frac{c}{2\pi a \sqrt{\varepsilon_r}} \left(\frac{s_1}{s_2 + e^{s_3 p}} + s_4 \right) \quad (2.28)$$

$$s_1 = -5.29q^4 + 15.97q^3 - 17.74q^2 + 8.812q - 3.198 \quad (2.29)$$

$$s_2 = 0.2706q^4 - 0.7232q^3 + 0.7857q^2 - 0.4558q - 1.023 \quad (2.30)$$

$$s_3 = -8.03q^4 + 23.06q^3 - 24.53q^2 + 11.75q - 3.588 \quad (2.31)$$

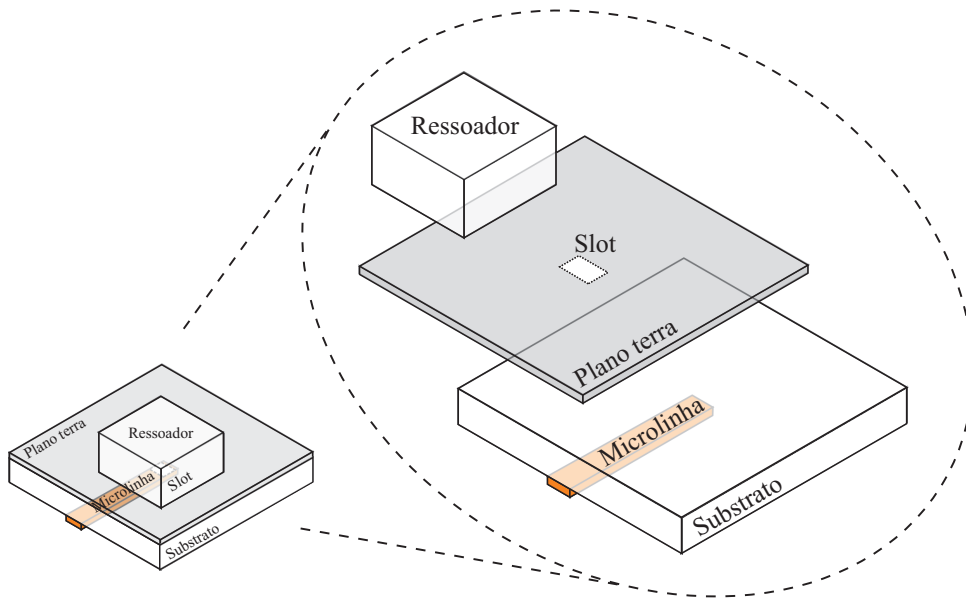
$$s_4 = 43.18q^4 - 124.7q^3 + 134.5q^2 - 65.85q + 15.37 \quad (2.32)$$

Onde $p = \frac{b}{a}$ e $q = \frac{d}{a}$. O erro estimado para este método é de 3% para valores de p entre 0.4 e 1, de q entre 0.2 e 1, e de ϵ_r entre 6 e 100. A comparação é feita com o modelo equivalente de guia de ondas dielétrico (DWM) [23]. Portanto, sendo possível estipular arbitrariamente valores para a , seguindo as condições das equações acima. Em seguida, realizar varreduras numéricas usando *softwares* com a Equação 2.28 a Equação 2.32

2.4 Alimentação de uma DRA

A excitação de uma antena ocorre por meio da aplicação de energia em um condutor, permitindo que essa energia seja direcionada para a componente responsável pela irradiação dos sinais [25]. De forma geral, o modo de excitação abordado neste trabalho é uma linha de microfita (ou microlinha) associada a um *slot* conforme a Figura 2 mostra.

Figura 2 – Ilustração do modelo de alimentação para a antena (Autor, 2025).



A linha de alimentação é embutida no substrato e a ranhura (*slot*) pode ser posicionada entre o ressonador e o substrato. A abertura do *slot* induz uma corrente magnética no ressonador ao longo de seu comprimento, que excita os campos magnéticos, colocando a antena em operação [26]. O projeto da antena com alimentação por microfita é diretamente relacionado às componentes da antena, como a altura do substrato (h_{sub}), à frequência de ressonância (f) e à impedância desejada (Z_c). Desta forma, a largura (W_{strip}) da microlinha pode ser calculada por:

$$W_{strip} = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.33)$$

A permissividade relativa efetiva é calculada por:

$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h_{\text{sub}}}{W_{\text{strip}}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

Portanto, Z_c é definido por:

$$\begin{cases} Z_c = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}} \left[\ln \left(\frac{8h_{\text{sub}}}{W_{\text{strip}}} + \frac{W_{\text{strip}}}{4h_{\text{sub}}} \right) \right], & \frac{W_{\text{strip}}}{h_{\text{sub}}} < 1 \\ Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}} \left[\frac{W_{\text{strip}}}{h_{\text{sub}}} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_{\text{strip}}}{h_{\text{sub}}} + 1.444 \right) \right], & \frac{W_{\text{strip}}}{h_{\text{sub}}} > 1 \end{cases} \quad (2.35)$$

Para simplificar, se considera $Z_c = 50 \Omega$. O comprimento da microlinha pode ser definido através da Equação 2.36 [27]:

$$L_{\text{strip}} = \frac{\lambda_g}{6} \quad (2.36)$$

λ_g é o comprimento de onda guiado através do material, definido como:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_e}}, \quad \varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + \varepsilon_s}{2} \quad (2.37)$$

Onde ε_r é a permissividade do ressonador, ε_s é a permissividade do substrato, e $\lambda_0 = c/f$ é o comprimento de onda no vácuo. O *slot* pode ser projetado pela Equação 2.38 e acoplado no centro do plano terra. L_{lst} é o comprimento do *slot* na direção x , e W_{lst} é o comprimento do *slot* na direção y .

$$L_{\text{lst}} = \frac{0.4\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_e}}, \quad W_{\text{lst}} = 0.2L_{\text{lst}} \quad (2.38)$$

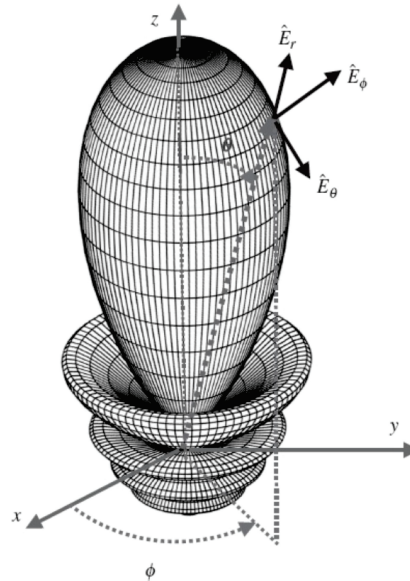
Dessa forma é possível realizar simulações em *softwares* como HFSS ou CST, utilizando os parâmetros encontrados em análise numérica provenientes de *softwares* como GNU Octave ou MatLab, varrendo o parâmetro do *slot* L_{lst} e a microlinha L_{strip} , w_0 .

2.5 Parâmetros de análise de antenas

2.5.1 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação ilustra a distribuição espacial da radiação emitida pela antena, mostrando a intensidade em diferentes direções. Este diagrama é crucial para entender o comportamento direcional da antena e pode ilustrar tanto os campos elétricos e magnéticos irradiados quanto as potências radiadas, conforme a Figura 3 ilustra. A partir do diagrama de radiação, podemos analisar como a antena direciona sua energia e qual é a sua capacidade de concentrar radiação em direções específicas.

Figura 3 – Diagrama de radiação normalizado em 3D, componentes do campo elétrico (Adaptado de [22]).



2.5.2 Ganho e Eficiência de Radiação

O ganho de uma antena está diretamente relacionado ao seu diagrama de radiação. Ele representa a razão entre a intensidade irradiada em uma direção específica e a intensidade irradiada por uma antena de referência na mesma direção [22], e pode ser calculado por:

$$G_0(\theta, \phi) = \epsilon_0 D_0(\theta, \phi) \quad (2.39)$$

O ganho é um reflexo da diretividade da antena, que indica sua capacidade de concentrar radiação em uma direção específica. A eficiência de radiação, por sua vez, mede a proporção da potência fornecida à antena que é efetivamente convertida em radiação. Em antenas com alta eficiência, a maior parte da energia de entrada é convertida em radiação, enquanto em antenas com baixa eficiência, a energia é perdida internamente ou refletida devido a incompatibilidades de impedância [26, 22]. A eficiência é expressa por:

$$\epsilon_0 = \epsilon_r \epsilon_c \epsilon_d \quad (2.40)$$

Onde $\epsilon_r = (1 - |\Gamma|^2)$, ϵ_c é a eficiência de condução e ϵ_d é a eficiência dielétrica.

2.5.3 Fator de Qualidade

O fator de qualidade (Q) quantifica a seletividade de um ressonador para uma frequência específica. Valores elevados de Q indicam menor risco de interferências na banda passante, sendo definido como a relação entre a energia armazenada e a potência radiada [21]. O fator de qualidade é fundamental para entender a largura de banda da

antena, pois ele influencia diretamente a faixa de frequências em que a antena opera eficazmente.

2.5.4 Largura de Banda de uma DRA

A largura de banda de uma antena define a faixa de frequências em que a antena opera de maneira eficaz, atendendo aos requisitos de eficiência e potência irradiada. Para uma DRA, a largura de banda depende das dimensões físicas e da permissividade do dielétrico utilizado [26]. A relação entre a largura de banda (*Bandwidth*) da DRA e o fator de qualidade Q é dada por:

$$BW = \frac{s - 1}{Q\sqrt{s}} \times 100 \quad (2.41)$$

Onde s é o *VSWR* desejado para a antena. A largura de banda é avaliada na faixa de -10 dB, onde a antena entrega cerca de 90% da sua potência, o que está diretamente relacionado ao coeficiente de reflexão.

2.5.5 Coeficiente de Reflexão

O coeficiente de reflexão mede a quantidade de energia refletida de volta para a fonte de alimentação devido à incompatibilidade de impedância entre a antena e a linha de transmissão [21, 26]. Representado por Γ ou S_{11} é calculado por:

$$S_{11} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.42)$$

Esse coeficiente é geralmente expresso em dB como *Return Loss*. Um valor menor de *Return Loss* indica uma melhor correspondência de impedância e, conseqüentemente, uma maior eficiência na transferência de energia para a antena, influenciando a largura de banda e a eficiência geral da antena [21].

2.5.6 Parâmetros Gerais de Desempenho de Antena

Os parâmetros gerais de desempenho de uma antena são essenciais para avaliar a eficácia da radiação emitida e a eficiência do sistema como um todo, a Tabela 1 e Tabela 2 resumem de forma concisa alguns desses resultados de antenas e RF.

Tabela 1 – Parâmetros gerais de desempenho da antena.

Parâmetro	Significado
Máxima densidade de potência irradiada (Max U)	Maior potência irradiada por unidade de ângulo sólido.

Continua na próxima página

Tabela 1 – continuação da página anterior

Parâmetro	Significado
Diretividade máxima	Concentração da radiação em uma direção específica, sem considerar perdas.
Ganho máximo	Diretividade ajustada pela eficiência de radiação.
Ganho realizado máximo	Ganho efetivo considerando perdas de impedância.
Ganho de sistema máximo	Ganho total incluindo todos elementos do sistema.
Potência irradiada	Energia realmente emitida em ondas eletromagnéticas.
Potência aceita	Energia efetivamente absorvida pela antena.
Potência incidente	Energia fornecida na entrada da antena.
Potência do sistema	Energia fornecida pelo transmissor para todo o sistema.
Eficiência de radiação	Razão entre a potência irradiada e a potência aceita.
Eficiência total	Eficiência geral da antena, incluindo perdas internas.
Eficiência do sistema	Rendimento global incluindo todos elementos.
Relação frente-costas (F/B)	Razão entre a radiação na direção principal e oposta.
Fator de decaimento	Indica a presença de modos evanescentes (≈ 0).

Tabela 2 – Componentes do campo elétrico da antena.

Componente	Significado
Total	Valor máximo do campo elétrico no espaço.
X, Y, Z	Componentes nas direções cartesianas.
ϕ	Componente na direção azimutal (horizontal).
θ	Componente na direção zenital (vertical).
LHCP / RHCP	Polarizações circulares esquerda e direita.
CoPolar	Componente na direção da polarização desejada.
CrossPolar	Componente ortogonal (indesejada).

2.6 Projetando DRAs, Considerações finais do capítulo

Partindo-se das etapas e equações dispostas neste capítulo é possível ter parâmetros para a projeção de antenas ressonadoras dielétricas, podendo-se projetar DRAs seguindo formulações de engenharia padrão como aquelas dispostas na Equação 2.23 a Equação 2.32 [12, 21, 26, 28, 29]. Dessa forma, é possível avaliar a operacionalidade das antenas desenvolvidas.

3 TEORIA DE MATERIAIS

3.1 Introdução

Materiais são essenciais na ciência e engenharia, fornecendo o conhecimento para entender propriedades, comportamentos e aplicações em diversas tecnologias. O estudo de suas características físicas e químicas permite projetá-los de forma otimizada para atender demandas específicas. Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais para a análise e desenvolvimento de materiais, oferecendo uma base para as aplicações discutidas nos capítulos seguintes.

3.2 Dielétricos

Materiais dielétricos não conduzem eletricidade, ou seja, atuam como isolantes. A distinção entre um material dielétrico e um isolante depende da sua aplicação. Quando a principal função do material é impedir a passagem de corrente elétrica, ele é classificado como um isolante. No entanto, se o objetivo é permitir o armazenamento de cargas elétricas, ele é considerado um dielétrico. Em sua maioria, esses materiais são de natureza não metálica e apresentam alta resistividade elétrica.[30, 31].

Quando um material dielétrico é exposto a um campo elétrico externo e responde aceitando a eletricidade ativamente, ele é denominado dielétrico ativo. Estes materiais têm a capacidade de armazenar energia de forma eficiente, adaptando-se ao campo elétrico [31]. Por outro lado, os dielétricos passivos restringem o fluxo de eletricidade e funcionam predominantemente como isolantes. Eles não participam ativamente no armazenamento de energia elétrica, atuando mais como barreiras ao fluxo de corrente [31].

3.2.1 Permissividade

A permissividade representa a propriedade dielétrica de um meio e indica a natureza facilmente polarizável de um material, em outras palavras, ela mede quão bem o material pode armazenar energia elétrica na forma de um campo eletrostático. Sua unidade de medida é farad por metro (F/m). Quanto maior a permissividade de um material, mais facilmente suas cargas internas se deslocam sob a ação do campo elétrico [32].

3.2.2 Constante Dielétrica

A constante dielétrica, também chamada de permissividade relativa (ϵ_r), é uma medida adimensional que compara a capacidade de um material de armazenar energia elétrica em relação ao vácuo. Ela indica o quanto o campo elétrico no material é reduzido

em comparação com o que seria no vácuo. Em outras palavras, é a razão entre a permissividade absoluta do meio (ϵ) e a permissividade do espaço livre (ϵ_0). [30, 31]

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (3.1)$$

3.3 Materiais Eletrocerâmicos

Materiais eletrocerâmicos são uma classe de materiais que possuem propriedades elétricas notáveis, como alta permissividade dielétrica, piezoeletricidade e ferroelectricidade. Essas características os tornam essenciais em diversas aplicações tecnológicas, particularmente em dispositivos que exigem alta precisão e estabilidade nas respostas elétricas [33].

No contexto das antenas DRA, os materiais eletrocerâmicos desempenham um papel crucial. A alta permissividade dielétrica desses materiais permite a miniaturização das antenas, mantendo uma eficiência elevada. Além disso, a baixa perda dielétrica contribui para a melhoria do fator de qualidade das antenas, resultando em uma maior seletividade e menor interferência em faixas de frequência próximas [34]. Em dispositivos transmissores de sinal, os materiais eletrocerâmicos são utilizados para garantir a precisão e a eficiência na transmissão e recepção de sinais. A estabilidade térmica e a baixa constante de perda desses materiais são fundamentais para manter a integridade do sinal em condições operacionais variadas, assegurando a operacionalidade dos dispositivos em aplicações críticas, desde comunicações sem fio até tecnologias de radar avançadas [35].

3.3.1 Compósitos Eletrocerâmicos

Compósitos são especialmente úteis em aplicações que exigem alta performance dielétrica, estabilidade térmica e baixo fator de perda, em função do uso de diferentes cargas na matriz. Por ser um compósito, isso permite a otimização de propriedades, como a constante dielétrica (ϵ_r) e o coeficiente de temperatura, através do controle da proporção e da microestrutura [36].

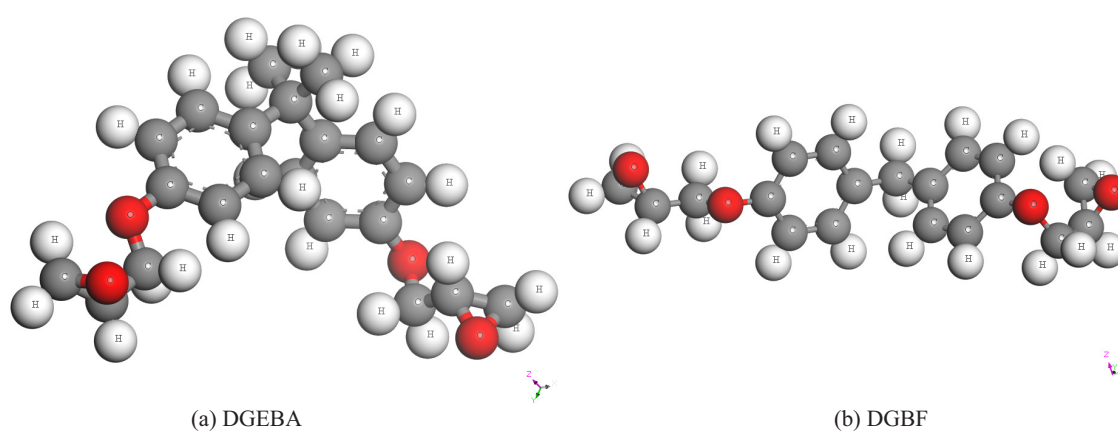
3.3.1.1 Compósito EP/TiO₂

O compósito EP/TiO₂ (multi-fases)¹ (Compósito polimérico-cerâmico) é um material funcional, suas propriedades combinam a resistência mecânica, características dielétricas da resina epóxi (polímero) e as propriedades ópticas e dielétricas (fases cristalinas) do dióxido de titânio (cerâmico)[37, 38].

¹ Os termos EP/TiO₂, EP/TiO₂ (multi-fases), compósito polímero-cerâmico, compósito multifásico e resina epóxi com dióxido de titânio em fases são utilizados ao longo deste trabalho como sinônimos. A escolha de cada termo depende do contexto técnico ou estrutural em que o material está sendo descrito.

As resinas epóxi são uma classe de polímeros termofixos. Entre os tipos mais comuns estão a DGEBA (Bisfenol A diglicidil éter), a DGBF (Bisfenol F diglicidil éter). A DGEBA é uma das resinas epóxi mais utilizadas, conhecida por sua alta resistência térmica e boa adesão, enquanto a DGBF oferece menor viscosidade e maior resistência química. Polímeros termofixos, como o nome sugere, são materiais que após cura (reticulação) não perdem resistência mecânica com o calor. Formam uma estrutura tridimensional rígida e irreversível, resultante de ligações cruzadas entre suas cadeias, o que resulta em alta resistência térmica, mecânica e química.

Figura 4 – Representação molecular de algumas resinas epóxi (Adaptado de [39]).



Os agentes de cura desempenham um papel crucial na reticulação das resinas epóxi. Eles atuam como catalisadores ou endurecedores, promovendo reações químicas que formam uma rede tridimensional de ligações covalentes, tornando o polímero rígido e resistente. Isso confere ao material uma excelente resistência mecânica, resistência à corrosão e estabilidade dimensional [40]. Além disso, a resina epóxi possui propriedades dielétricas conforme a Tabela 3 dispõe, sendo um dielétrico passivo é altamente isolante, com baixa permissividade e alta rigidez dielétrica, não possuindo propriedades eletrônicas controláveis ou comutáveis, contudo, passíveis de mudança quando observado o uso em compósitos.

Figura 5 – Representação molecular de alguns endurecedores (reticuladores) (Adaptado de [39]).

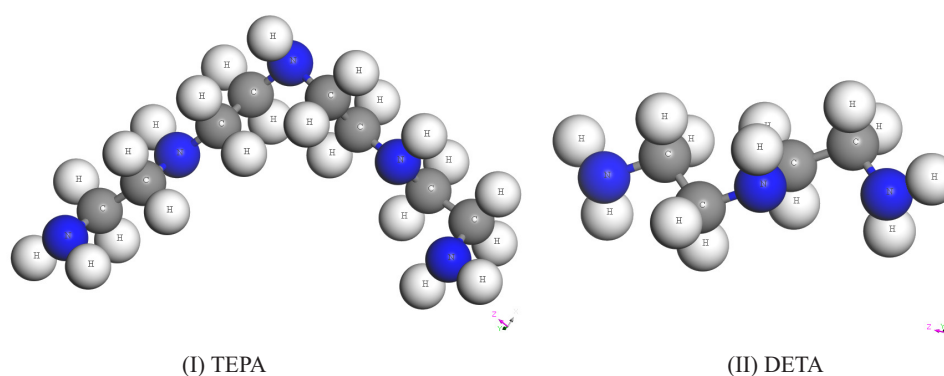


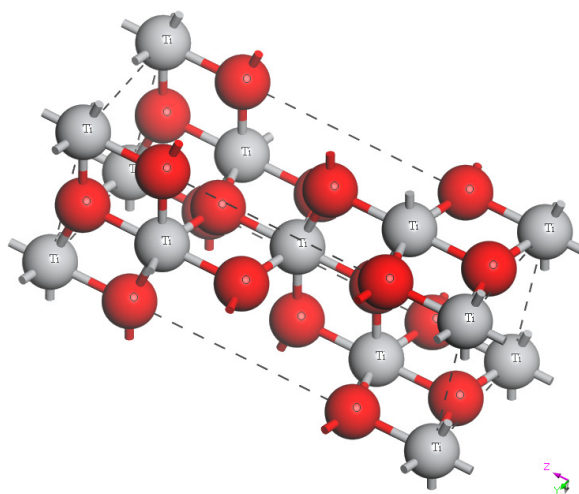
Tabela 3 – Propriedades dielétricas da DGEBA, TEPA e resina epóxi DGEBA+TEPA

Material	ϵ_r	$\tan \delta$	Referência
DGEBA (EPON 828)	3 – 5	0,002 – 0,020	[41]
TEPA (EPIKURE 3234)	11,4 (1 kHz, 25 °C)	–	[42]
Resina epóxi (DGEBA+TEPA)	3 – 5	0,002 – 0,020	[41]

Ao observar os valores de ϵ_r do TEPA na resina epóxi, nota-se uma mínima influência, muito em função de o agente de cura TEPA deixar de existir como molécula livre e passar a integrar a rede polimérica tridimensional resultante da reação com o DGEBA. Nesse estado reticulado, sua contribuição individual à constante dielétrica é significativamente reduzida, pois há menor mobilidade molecular e polarização efetiva. Além disso, a fração volumétrica do TEPA no sistema é baixa, e a matriz final é dominada estruturalmente e eletricamente pelas características do DGEBA curado.

O TiO_2 , por outro lado, é um material cerâmico conhecido por sua alta constante dielétrica, estabilidade química, e resistência térmica. Ele pode apresentar diferentes fases cristalinas.[38].

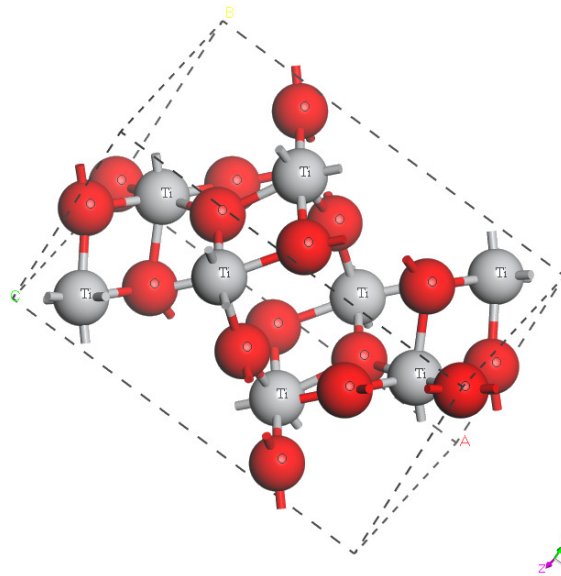
A fase anatase possui uma estrutura tetragonal (Figura 6). Nessa configuração, o átomo de titânio é central, rodeado por seis átomos de oxigênio, formando octaedros alongados. Essa disposição estrutural resulta em uma alta constante dielétrica e excelente atividade fotocatalítica [43]. No contexto de antenas DRA, a anatase contribui para a miniaturização, além de oferecer boa eficiência de radiação devido às suas propriedades dielétricas. No entanto, apresenta menor densidade cristalina, o que pode limitar sua estabilidade mecânica em algumas aplicações de alto desempenho.

Figura 6 – Representação molecular do TiO_2 fase cristalina Anatase (Autor, 2025).

A fase brookita é uma forma cristalina menos comum do TiO_2 , porém com bom potencial em aplicações. Possui estrutura cristalina ortorrômbica, o que proporciona

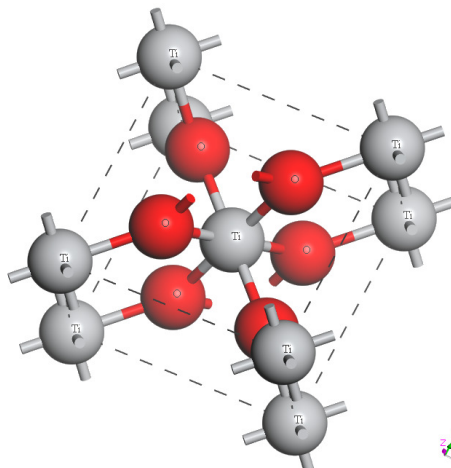
características anisotrópicas em compósitos [43]. Embora menos estável do que anatase e rutilo, a brookita pode melhorar a dispersão do campo eletromagnético em antenas e dispositivos eletrônicos, devido à sua combinação única de propriedades dielétricas e eletrônicas, sendo promissora em estudos de novos materiais para antenas avançadas.

Figura 7 – Representação molecular do TiO_2 fase cristalina Brookita (Autor, 2025).



A fase rutilo é a mais estável e densa possuindo uma estrutura cristalina também tetragonal, com alta constante dielétrica e condutividade térmica [43]. Essas características fazem do rutilo a fase ideal para aplicações em antenas DRA, onde a alta constante dielétrica permite o confinamento efetivo das ondas eletromagnéticas e a melhoria do desempenho da antena. Além disso, sua estabilidade térmica e química torna o rutilo adequado para dispositivos eletrônicos que operam em condições extremas, garantindo a eficiência das antenas em uma ampla faixa de frequências. [44].

Figura 8 – Representação molecular do TiO_2 fase cristalina Rutilo (Autor, 2025).



As diferentes fases cristalinas para o TiO_2 apresentam diferentes valores de permissividade, isso se deve à diferença na estrutura cristalina e no empacotamento dos íons. A estrutura cristalina do rutilo é mais densa e simétrica, permitindo maior polarização sob campo elétrico externo, o que resulta em uma permissividade muito mais alta comparada às fases anatase e brookita, que possuem estruturas menos densas e mais distorcidas.

Além disso, a mobilidade dos portadores de carga e a presença de defeitos estruturais influenciam diretamente na constante de perdas. A anatase e a brookita, com menor polarização e estrutura mais aberta, geralmente exibem valores de ϵ_r mais baixos. A depender do método e pureza, muitos autores classificam valores para as fase Anatase em 30-50, Brookita 20-40 e Rutilo 80-170 [45, 46], ou ainda, autores com trabalhos mais específicos como os citados na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades dielétricas das fases cristalinas do TiO_2

Fase	ϵ_r	$\tan \delta$	Referência
Anatase	18,9	0,130	[47, 48]
Brookita	~20	<0,05	[49, 50]
Rutilo	63,7	0,051	[47, 51]

3.3.2 Fosfato de Lítio e Magnésio (LMP)

Entre os materiais eletrocerâmicos utilizados em aplicações de radiofrequência e micro-ondas, além do TiO_2 destaca-se o fosfato $0,5\text{LiMgPO}_4-0,1\text{CaTiO}_3-0,4\text{K}_2\text{MoO}_4$ (LMP). O LMP, um fosfato de lítio e magnésio, evidencia-se por sua boa estabilidade térmica, moderada permissividade dielétrica e baixa constante de perda [6], tornando-se uma alternativa interessante para aplicações que exigem eficiência na propagação do sinal e controle de perdas, um opção viável e pouco explorada para aplicações como a disposta neste trabalho. A presença de fases como CaTiO_3 e K_2MoO_4 contribui para a otimização das propriedades dielétricas e térmicas do material, a Tabela 5 dispõe melhor as informações.

Tabela 5 – Propriedades dielétricas dos constituintes do LMP

Material	ϵ_r	$\tan \delta$	Referência
LiMgPO_4	6–8	< 0,001	[52]
CaTiO_3	150–170	~0,0005	[53, 54]
K_2MoO_4	10–12	~0,001	[55, 56]
LMP	~9.1	< 0,001	[6]

3.4 Projetando Compósitos, considerações finais do capítulo

Partindo-se das etapas dispostas neste capítulo é possível ter parâmetros para a projeção de compósitos e materiais dielétricos tecnológicos. A combinação de resina epóxi com TiO₂ em suas diferentes fases cristalinas oferece uma abordagem flexível para adaptar as propriedades do material às necessidades específicas de cada aplicação. O compósito EP/TiO₂ (multi-fases) consiste em partículas cerâmicas de TiO₂ (fase dispersa) incorporadas fisicamente em uma matriz orgânica polimérica termofixa (fase contínua), formada pela cura da DGEBA com TEPA.

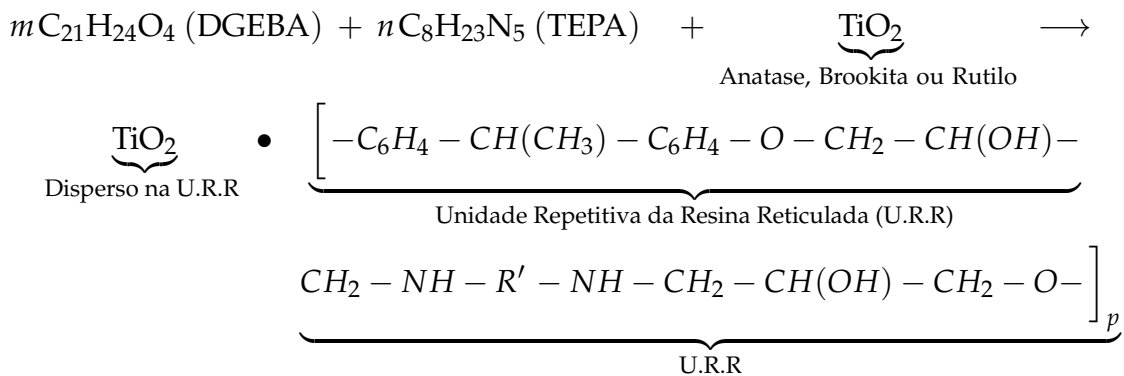
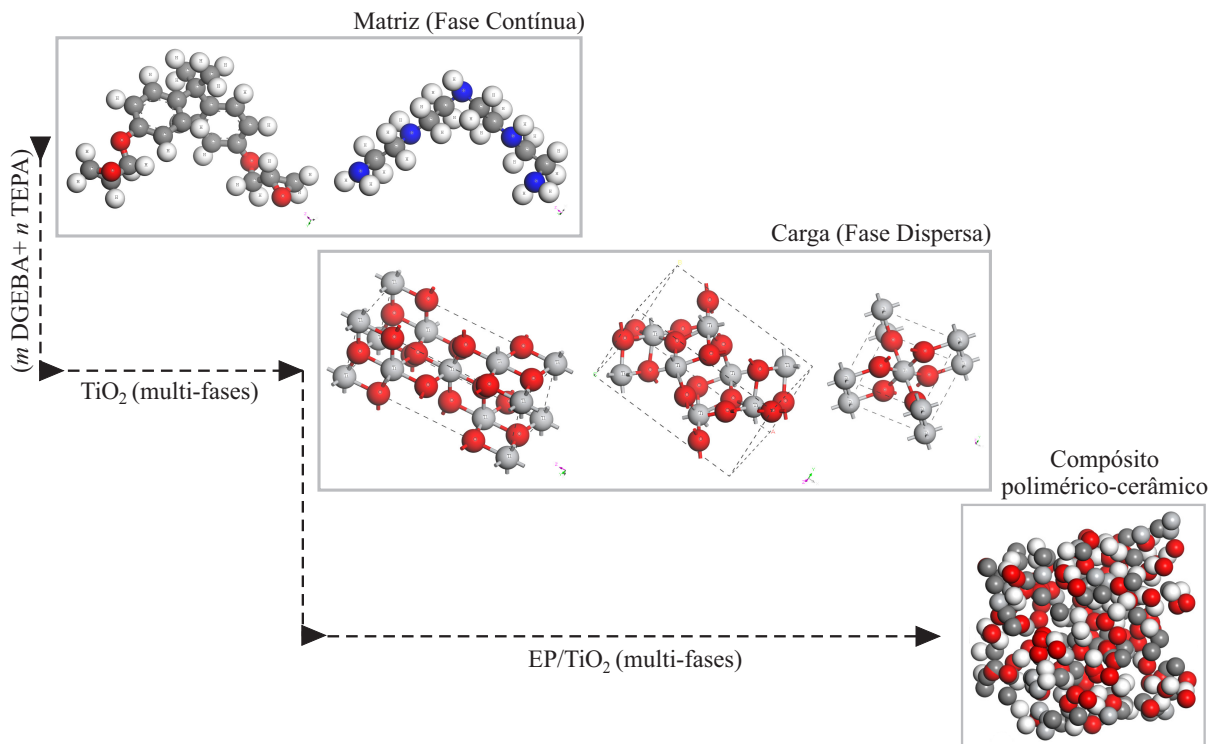


Figura 9 – Representação/Esquematização molecular do Compósito polimérico-cerâmico (autor, 2025).



4 METODOLOGIA

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta os métodos empregados na análise, estudo e formulação dos materiais. São descritos alguns dos procedimentos de estudo e experimentação teórica/simulada fundamentais para garantir a compreensão.

4.2 Materiais e suas Abordagens

Cada material possui propriedades elétricas específicas que influenciam diretamente no comportamento das ondas dentro de dispositivos e sistemas analisados. Este item apresenta os principais materiais utilizados no projeto em questão, bem como as abordagens adotadas para sua modelagem e inserção no ambiente de simulação. O Compósito polimérico-cerâmico foi estudado via três métodos, sendo eles:

- Literatura: a qual abordou valores e *range* de resultados principalmente para a constante dielétrica (permissividade) e constante perdas dielétricas (dissipação de energia) para cada fase do material (reforço) e para a matriz.
- *Software* de simulação e modelagem de materiais: Análise e comparação norteando valores para as propriedades de $Re(\epsilon)$ e $Im(\epsilon)$ para o Compósito EP/TiO₂ (multi-fases).
- Simulação numérica: Através de análise por modelos matemáticos como os dispostos na Capítulo 4 Seção 4.4, Figura 10 e Figura 11, é possível acercar os valores de forma mais acertada, conseguindo chegar aos valores de ϵ_r e $\tan \delta$ para o Compósito EP/TiO₂ (multi-fases).
O LMP foi estudado via método:
- Literatura: Abordando valores de permissividade e perdas dielétricas, características ímpares para aplicação em RF e antenas, além de norteamento sobre alguns blocos hierárquicos e dados fixos de implementação em *software*.

Tanto o Compósito EP/TiO₂ (multi-fases) quanto o Fosfato LMP foram aplicados como subcomponente ao modelo de antena, sendo simulados no *software* HFSS.

4.3 Metadados de Simulação e entradas de *software*

4.3.1 TiO₂ Fase Cristalina Anatase

A simetria cristalina da estrutura é definida pelo grupo espacial $I4_1/amd$, característico da fase anatase. Esse grupo pertence ao sistema tetragonal, o que significa que os parâmetros de rede nos eixos a e b são iguais, enquanto o eixo c pode ter um valor diferente. Podendo haver várias operações de simetria que descrevem como a estrutura se repete tridimensionalmente para formar o cristal. Essas operações incluem reflexões,

rotações e translações dos átomos dentro da célula unitária. A célula unitária da fase anatase do TiO_2 possui os comprimentos dos eixos a e b de 3,7760 Å, enquanto o eixo c mede 9,4860 Å. Os ângulos internos da célula são todos 90° . O titânio (Ti) está localizado na origem (0,0,0), enquanto o oxigênio (O) está deslocado ao longo do eixo c em 0,208 da altura total da célula unitária. O fator de ocupação dos átomos é 1.00, indicando que esses sítios estão completamente preenchidos na estrutura. O titânio forma ligações com átomos de oxigênio em distâncias que variam entre 1,930 Å e 1,973 Å. Indicando que os átomos de oxigênio estão coordenados ao titânio, formando uma geometria octaédrica característica dessa fase [57, 58].

4.3.2 TiO_2 Fase Cristalina Brookita

A fase brookita do TiO_2 pertence ao grupo espacial PBCA, característico de estruturas ortorrômbicas. A célula unitária apresenta três eixos com comprimentos diferentes ($a \neq b \neq c$), mas mantém ângulos internos de 90° entre eles. Os parâmetros utilizados para a célula unitária da brookita são: $a = 9,1660$ Å, $b = 5,4360$ Å e $c = 5,1350$ Å. Essa diferenciação nas distâncias afeta diretamente as propriedades físicas do material, incluindo sua estabilidade e comportamento eletrônico. A disposição dos átomos dentro da célula unitária é apresentada por meio das coordenadas fracionárias. O titânio (Ti) está localizado em (0.12700, 0.11320, -0.12700), enquanto os átomos de oxigênio (O_2 e O_3) estão distribuídos em (0.01000, 0.15500, 0.18000) e (0.23000, 0.10500, -0.46500), respectivamente. Essas posições definem a geometria e a conectividade da rede cristalina. O Ti forma ligações Ti-O variando entre 1,920 Å e 1,982 Å, sugerindo uma coordenação distinta em relação às fases anatase e rutilo [59, 60].

4.3.3 TiO_2 Fase Cristalina Rutilo

A estrutura do rutilo pertence ao grupo espacial $P4_2/mnm$, que caracteriza uma simetria tetragonal. Essa estrutura é definida por dois eixos iguais ($a = b$) e um eixo distinto (c), com todos os ângulos internos de 90° , influenciando diretamente as propriedades do material. Os parâmetros de rede para a célula unitária do rutilo são $a = 4,5940$ Å, $b = 4,5940$ Å e $c = 2,9590$ Å. Essa característica confere ao rutilo maior estabilidade estrutural em comparação com as demais fases. A estrutura atômica é composta por átomos de titânio (Ti) e oxigênio (O) dispostos de maneira altamente simétrica. O titânio (Ti) está localizado na origem da célula unitária, em (0.00000, 0.00000, 0.00000), enquanto o oxigênio (O) ocupa posições fracionárias em (0.30480, 0.30480, 0.00000). Essa disposição define a típica coordenação octaédrica do rutilo, onde cada átomo de titânio é rodeado por seis átomos de oxigênio. As distâncias de ligação Ti-O variam entre 1,949 Å e 1,980 Å, refletindo a pequena anisotropia estrutural da fase rutilo. Essas ligações fortes e simétricas resultam em alta estabilidade química e excelentes propriedades ópticas, tornando essa fase altamente eficiente para aplicações

em fotocatalise, antenas e sensores ópticos [61, 62]. As operações de simetria do grupo espacial correspondente à estrutura do TiO_2 nas fases, estão listadas na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Comparação das operações de simetria do TiO_2 nas fases rutilo, anatase e brookita.

Rutilo ($P4_2/mnm$)	Anatase ($I4_1/amd$)	Brookita ($Pbca$)
(x, y, z)	(x, y, z)	(x, y, z)
$(-x, -y, z)$	$(-x + \frac{1}{2}, -y + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2})$	$(-x + \frac{1}{2}, -y, z + \frac{1}{2})$
$(-y + \frac{1}{2}, x + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2})$	$(-y, x + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{4})$	$(-x, y + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{2})$
$(y + \frac{1}{2}, -x + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2})$	$(y + \frac{1}{2}, -x, z + \frac{3}{4})$	$(x + \frac{1}{2}, -y + \frac{1}{2}, -z)$
$(-x + \frac{1}{2}, y + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{2})$	$(-x + \frac{1}{2}, y, -z + \frac{3}{4})$	$(-x, -y, -z)$
$(x + \frac{1}{2}, -y + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{2})$	$(x, -y + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{4})$	$(x + \frac{1}{2}, y, -z + \frac{1}{2})$
$(y, x, -z)$	$(y + \frac{1}{2}, x + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{2})$	$(x, -y + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2})$
$(-y, -x, -z)$	$(-y, -x, -z)$	$(-x + \frac{1}{2}, y + \frac{1}{2}, z)$
$(-x, -y, -z)$	$(-x, -y + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{4})$	
$(x, y, -z)$	$(x + \frac{1}{2}, y, -z + \frac{3}{4})$	
$(y + \frac{1}{2}, -x + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{2})$	$(y, -x, -z)$	
$(-y + \frac{1}{2}, x + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{2})$	$(-y + \frac{1}{2}, x + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{2})$	
$(x + \frac{1}{2}, -y + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2})$	$(x + \frac{1}{2}, -y + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2})$	
$(-x + \frac{1}{2}, y + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2})$	$(-x, y, z)$	
$(-y, -x, z)$	$(-y + \frac{1}{2}, -x, z + \frac{3}{4})$	
(y, x, z)	$(y, x + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{4})$	
	$(x + \frac{1}{2}, y + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2})$	
	$(-x, -y, z)$	
	$(-y + \frac{1}{2}, x, z + \frac{3}{4})$	
	$(y, -x + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{4})$	
	$(-x, y + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{4})$	
	$(x + \frac{1}{2}, -y, -z + \frac{3}{4})$	
	$(y, x, -z)$	
	$(-y + \frac{1}{2}, -x + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{2})$	
	$(-x + \frac{1}{2}, -y, -z + \frac{3}{4})$	
	$(x, y + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{4})$	
	$(y + \frac{1}{2}, -x + \frac{1}{2}, -z + \frac{1}{2})$	
	$(-y, x, -z)$	
	$(x, -y, z)$	
	$(-x + \frac{1}{2}, y + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{2})$	
	$(-y, -x + \frac{1}{2}, z + \frac{1}{4})$	
	$(y + \frac{1}{2}, x, z + \frac{3}{4})$	

4.3.4 Diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA)

A estrutura molecular do DGEBA consiste em uma unidade central de bisfenol A ligada a dois grupos epóxi terminais. O que proporciona alta reatividade, tornando-o ideal para aplicações em revestimentos protetivos e matrizes de compósitos. As ligações C–O nos grupos epóxi apresentam comprimentos médios de aproximadamente 1,43 Å, enquanto as ligações C–C dentro do anel aromático mantêm uma distribuição típica de 1,39 Å. Os ângulos de ligação no anel aromático seguem um padrão próximo de 120°. A disposição atômica do DGEBA influencia diretamente suas propriedades mecânicas e térmicas. O sistema de ligações covalentes rígidas combinado com a flexibilidade das cadeias laterais permite uma excelente resistência química, tornando este material ideal para aplicações estruturais e elétricas, como as dispostas neste trabalho. A presença dos grupos epóxi nas extremidades da molécula possibilita sua cura com agentes endurecedores como aminas ou anidridos, formando redes tridimensionais altamente reticuladas [63, 64].

4.3.5 Tetraetilenopentamina (TEPA)

A estrutura do TEPA, com sua rede complexa de ligações C – N e N – H, confere ao composto propriedades únicas de reatividade, solubilidade e interação química. O TEPA é composto predominantemente por átomos de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N). A estrutura contém múltiplas ligações carbono-nitrogênio, características da cadeia poliéteramina. As principais Ligações Químicas: Ligações C – C: Aproximadamente 1.540 Å; C – N: Aproximadamente 1.509 – 1.510 Å; C – H: Aproximadamente 1.140 Å e N – H: Aproximadamente 1.110 Å.

A presença de grupos amina (–NH) e metileno (–CH₂–) proporciona ao TEPA sua flexibilidade estrutural e reatividade química. O arranjo triclinico da célula unitária indica uma estrutura sem simetria de alta ordem, o que pode influenciar suas propriedades cristalinas e interações intermoleculares [65, 66].

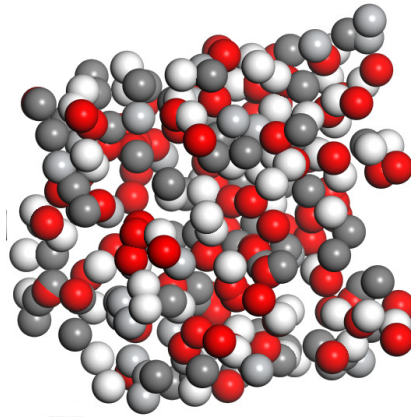
O TEPA é amplamente utilizado em síntese de resinas epóxi como agente de cura e modificação de superfícies poliméricas para melhorar a adesão e reatividade.

4.3.6 Compatibilidade

A escolha da resina epóxi DGEBA com o agente de cura TEPA se dá pela excelente compatibilidade reativa entre os grupos epóxi do DGEBA e os grupos amina do TEPA, formando uma rede tridimensional estável após a cura. Essa matriz apresenta boas propriedades mecânicas, térmicas e químicas. O TiO₂, quando disperso em fases na matriz, mostra boa interação interfacial com o sistema DGEBA/TEPA devido à presença de grupos hidroxila na superfície do TiO₂, que podem formar ligações de hidrogênio ou interações secundárias com a matriz polimérica. Isso favorece a adesão

interfacial, contribuindo para melhor transferência de carga e resistência do compósito. A combinação é, portanto, coerente e funcional [67, 68].

Figura 10 – Exemplificação do compósito reticulado com matriz EP e reforço de TiO₂. (Autor, 2025).



4.3.7 Fosfato LMP

O fosfato $0,5\text{LiMgPO}_4-0,1\text{CaTiO}_3-0,4\text{K}_2\text{MoO}_4$ (LMP) seguiu apenas a abordagem literária, sendo modelado e implementado no *software* eletromagnético de acordo com alguns dos blocos hierárquicos e dados fixos da Tabela 7:

Tabela 7 – Blocos hierárquicos e dados fixos para o material LMP modelado no *software* HFSS.

Bloco	Sub-bloco	Parâmetro	Valor
\$base_index\$	properties	all_levels	000000000000
		time	2025-04-16 16:29:00
		version	000000000000
	\$index\$	pos	803
		lin	19
		lvl	0
LMP_CTO_KMO	MaterialDef	CoordinateSystemType	Cartesian
		BulkOrSurfaceType	1
	PhysicsTypes		Electromagnetic
		permittivity	9.1
		dielectric_loss_tangent	0.001
		mass_density	2920
		ModTime	1612436333
		Library	LMP
		LibLocation	PersonalLibrary
ModSinceLib	false		

Continua na próxima página

Tabela 7 – continuação da página anterior

Bloco	Sub-bloco	Parâmetro	Valor
\$index\$	\$index\$	LMP_CTO_KMO(pos)	370
		\$base_index\$(pos)	0
		\$index\$(pos)	803

4.4 Predição de permissividade/Modelo de Misturas

Para estipular a permissividade de um material compósito, é possível empregar diversos modelos teóricos. Alguns como o modelo de fração volumétrica (Equação 4.1). Nesse modelo, a permissividade do compósito resultante pode ser estimada com base na fração volumétrica de cada componente na mistura.

$$\epsilon_c = V_m \epsilon_m + V_f \epsilon_f \quad (4.1)$$

Onde, ϵ_m e V_m representam a permissividade e a fração de volume da matriz (fase contínua), respectivamente, enquanto ϵ_f e V_f referem-se ao reforço (fase dispersa). Contudo, é um modelo modesto, pois assume uma distribuição homogênea e isotrópica das partículas de enchimento na matriz, o que raramente ocorre na prática. Alguns outros modelos assumem melhores resultados sendo mais complexos, são:

Modelo de Maxwell–Garnett:

$$\frac{\epsilon_c - \epsilon_m}{\epsilon_c + 2\epsilon_m} = V_f \frac{\epsilon_f - \epsilon_m}{\epsilon_f + 2\epsilon_m} \quad (4.2)$$

Modelo de Lichtenecker:

$$\log \epsilon_c = V_f \log \epsilon_f + (1 - V_f) \log \epsilon_m \quad (4.3)$$

Modelo de Jayasundere–Smith:

$$\epsilon_c = \epsilon_m (1 - V_f) + \epsilon_f V_f \cdot \left(\frac{3\epsilon_m}{\epsilon_f + 2\epsilon_m} \right) \cdot \left[1 + \frac{3V_f(\epsilon_f - \epsilon_m)}{\epsilon_f + 2\epsilon_m} \right] \quad (4.4)$$

Limite superior e inferior de Wiener:

$$\epsilon_c = V_f \epsilon_f + (1 - V_f) \epsilon_m \quad (4.5)$$

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_f \epsilon_m}{V_f \epsilon_f + (1 - V_f) \epsilon_m} \quad (4.6)$$

Modelo Bruggeman simétrico:

$$\epsilon_c = \frac{1}{4} \left[3V_f(\epsilon_f - \epsilon_m) + 2\epsilon_m - \epsilon_f + \sqrt{(1 - V_f)^2 \epsilon_f^2 + 2(2 + 9V_f - 9V_f^2) \epsilon_f \epsilon_m + (3V_f - 2)^2 \epsilon_m^2} \right] \quad (4.7)$$

Limite superior e inferior de Hashin-Shtrikman:

$$\epsilon_{HS}^+ = \epsilon_m + \frac{V_f}{\frac{1}{\epsilon_f - \epsilon_m} + \frac{1 - V_f}{3\epsilon_m}} \quad (4.8)$$

$$\epsilon_{HS}^- = \epsilon_f + \frac{1 - V_f}{\frac{1}{\epsilon_m - \epsilon_f} + \frac{V_f}{3\epsilon_f}} \quad (4.9)$$

Modelo Landau-Lifshitz/Looyenga:

$$\epsilon_{LLL} = \left(V_m \epsilon_m^{1/3} + V_f \epsilon_f^{1/3} \right)^3 \quad (4.10)$$

Modelo Rayleigh:

$$\epsilon_R = \epsilon_m + \frac{3V_f \epsilon_m (\epsilon_f - \epsilon_m)}{3\epsilon_m + 2V_f (\epsilon_f - \epsilon_m)} \quad (4.11)$$

Modelo Clausius-Mossotti:

$$\epsilon_{CL} = \epsilon_m \cdot \frac{\epsilon_f + 2\epsilon_m + 2V_f (\epsilon_f - \epsilon_m)}{\epsilon_f + 2\epsilon_m - V_f (\epsilon_f - \epsilon_m)} \quad (4.12)$$

A permissividade obtida por esses modelos pode então ser utilizada para observar a precisão, ou ainda servir como base de predição quando não for possível realizar medições para cada valor de carga e matriz em compósitos, tal método é eficiente e muito usado para aplicações como as dispostas neste trabalho. Seguindo o equacionamento da Seção 4.4 e modelos explicados na Tabela 8, aplicando-os em modelagem analítica [69], é possível chegar aos valores dispostos na Figura 11 para cada fase, ou ainda, de forma mais precisa, limitando a um *range* e enumerando pelos modelos conforme mostra a Figura 12 (todas as fases).

Tabela 8 – Modelos teóricos, suas bases físico-matemáticas e observações gerais.

Modelo	Base Físico-Matemática	Observações
Maxwell-Garnett	Campo médio	Inclusões em matriz dielétrica
Lichtenecker	Lei empírica log	Misturas heterogêneas
Jayasundere-Smith	Correção da Maxwell	Melhor para altas concentrações
Wiener (U/L)	Arranjo paralelo/série	Estimativas máximas/mínimas
Bruggeman	Equação implícita	Fases interpenetrantes
Hashin-Shtrikman	Energia mínima	Melhores limites teóricos
Looyenga	Média geométrica	Para materiais porosos
Rayleigh	Dispersão de campo	Variante da Maxwell
Clausius-Mossotti	Polarização	Relação com suscetibilidade

Figura 11 – Valores de ϵ_r em função da % de carga TiO_2 (Rutilo) no Compósito (Autor, 2025).

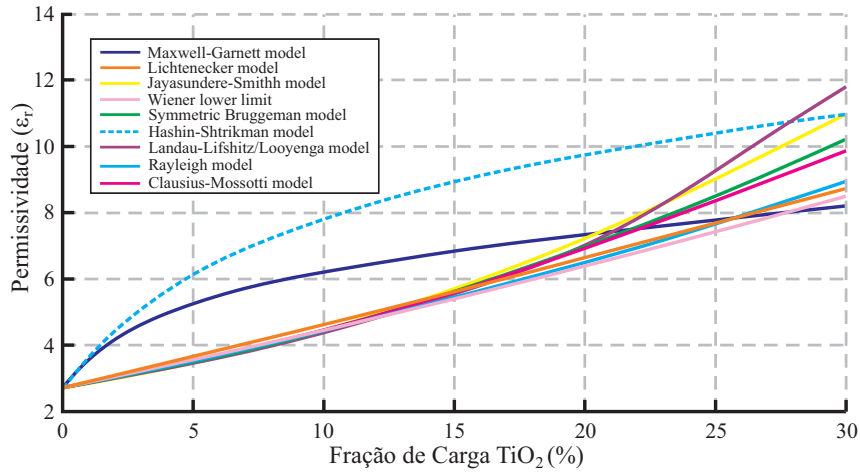
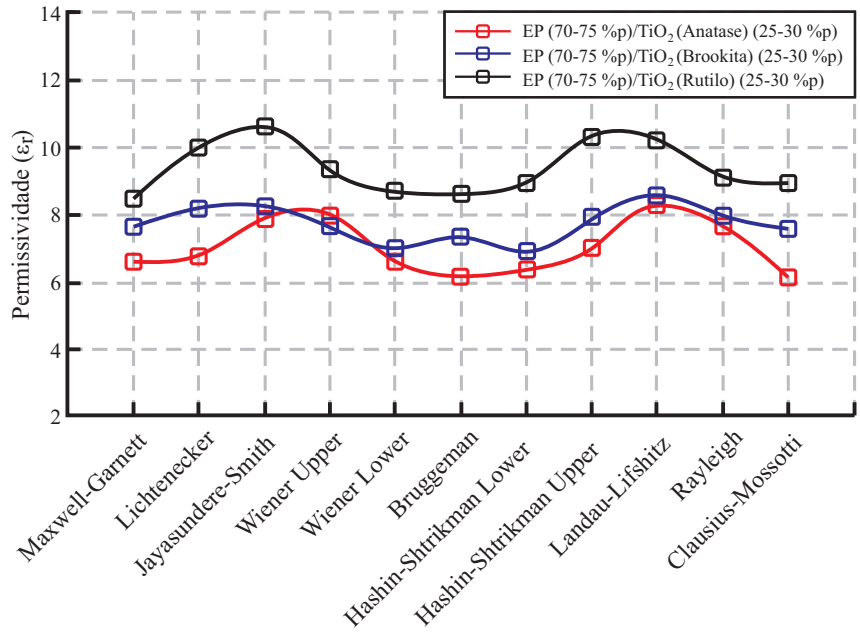


Figura 12 – Variação dos modelos em função da Carga em *range* (Autor, 2025).



A definição dos teores de carga de TiO_2 , variando entre 25 e 30% em peso, foi fundamentada na avaliação de um intervalo paramétrico, justificado pela aplicação de modelos computacionais que envolvem processos estocásticos de suavização e simulação. Essa abordagem levou em conta as variabilidades próprias às etapas de modelagem, esquematização e simulação, que visaram à obtenção dos parâmetros de permissividade elétrica e perdas dielétricas do compósito formado por EP e TiO_2 em fases. Definição a qual, paradoxalmente, contribui para uma melhor convergência dos resultados em torno de um valor representativo. A suavização estatística gerada por esse *range* permite atenuar flutuações pontuais e tornar os dados mais consistentes, refletindo com maior segurança o comportamento real do compósito frente às variações comuns do processo de síntese.

5 GEOMETRIA DA ANTENA: UM PROJETO

O modelo de antena obedece às equações padrões conforme [12, 21, 26, 28, 29] tendo seus parâmetros espelhados em cálculo, simulação e também analisados com base em literatura [5, 6, 47]. A antena ilustrada na Figura 13., de modo geral, possui seus componentes listados e especificados na Tabela Tabela 9. A antena foi simulada com um substrato feito de material composto por fibra de vidro e resina epóxi com permissividade relativa (ϵ_r) de 4.4 e ressonador dielétrico com valores dispostos na Tabela 10, adequando-se aos materiais propostos.

Figura 13 – Parâmetros e design do modelo de antena (Autor, 2025).

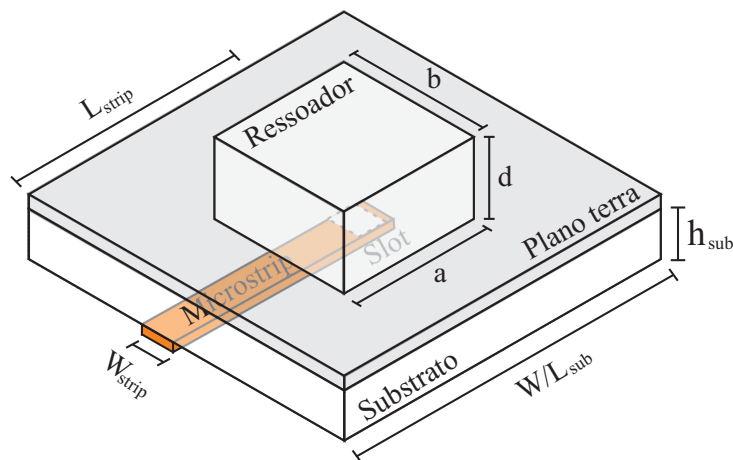


Tabela 9 – Parâmetros de design e suas respectivas medidas geométricas.

Parâmetro	Medida (mm)
$W_{sub} \times L_{sub}$	40 x 40
h_{sub}	1.6
$a \times b \times d$	20 x 18 x 15
$W_{strip} \times L_{strip}$	2.85 x 28
$W_{lst} \times L_{lst}$	1.875 x 12.5
Rad. Box	$\lambda/4$

Na Figura 13., é possível observar o modelo de antena, sendo visível todos os componentes previamente calculados no *software* MatLab [69] através de simulação numérica e também o modelo de alimentação por *Slot* que produz a condição de contorno adequada para a excitação da antena. [22].

A antena, basicamente segue o mesmo esquema (parâmetros e dimensões) para todos os materiais, haja visto a multifuncionalidade, apenas havendo a a diversificação dos materiais do ressonador.

O cálculo da permissividade e constante de perdas do material TiO_2 foi realizada através de simulação numérica, de materiais e comparativa com modelos da literatura para melhor embasamento, de forma a gerar *inputs* posteriormente utilizados no *software* HFSS para implementação no modelo de antena e análise simulada de resultados com variação de fases cristalinas e características do material, o material LMP foi implementado apenas no *software* HFSS.

Tabela 10 – Materiais, métodos e funções no projeto.

Material (25-30%p fase)	ϵ_r	Método	Função
EP/ TiO_2 (Anatase)	7.2	DFT, MD, AM e MEF	Ressonador
EP/ TiO_2 (Brookita)	7.9	DFT, MD, AM e MEF	Ressonador
EP/ TiO_2 (Rutilo)	9.15	DFT, MD, AM e MEF	Ressonador
Demais Materiais	ϵ_r	Método	Função
LMP	9.1	Literatura e MEF	Ressonador
FR4 - Epóxi	4.4	—	Substrato
Rad. Box	≈ 1	—	PML

5.1 *Software* de Simulação

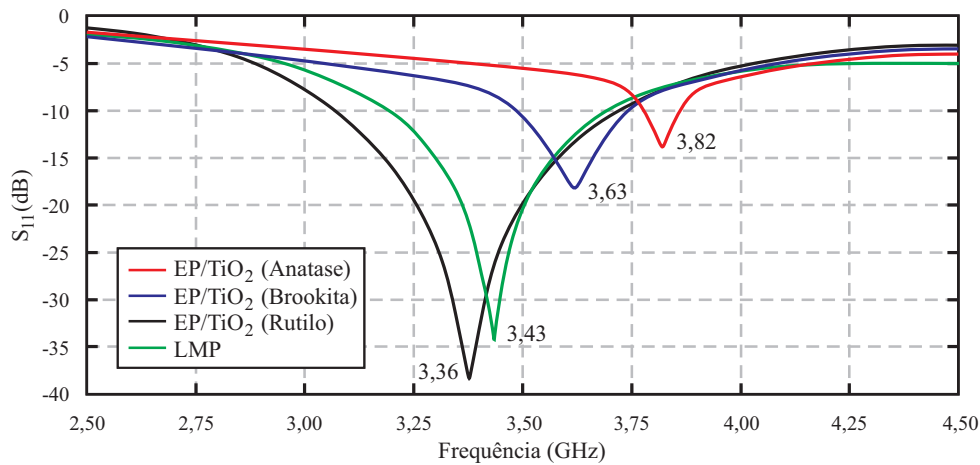
O HFSS é um programa que calcula os parâmetros S (parâmetros de dispersão) de estruturas passivas e ainda a distribuição em 3D de campos dessas estruturas, parâmetros estes os quais representam as características lineares de circuitos e componentes eletrônicos de RF, em outras palavras, os parâmetros S são relações entre ondas transitoriais nos terminais de determinados dispositivos a se caracterizar [70].

O HFSS utiliza como base os métodos de elementos finitos (MEF) o qual simplifica e torna factível o cálculo de estruturas complexas de engenharia. Este divide os objetos presentes no modelo em um grande número de pequenas regiões, as quais são denominadas de elementos finitos, e cada elemento é um tetraedro formada por quatro triângulos equiláterais, a isso é dado o nome de malha (*mesh*) [70].

5.2 Resultados e Discussões

A antena, inicialmente com ressonador modelado com o composto polimérico-cerâmico em fases da carga (Anatase, Brookita e Rutilo), foi simulada e analisada através de parâmetros como perdas de retorno, resistência, reatância, padrões de radiação e eficiência, na Figura 14 é possível ver os resultados encontrados para perda de retorno no range de frequência adotado, larguras de banda e valores para faixa de frequência ressoante.

Figura 14 – Coeficiente de reflexão para antena, frequência e BW (Autor, 2025).



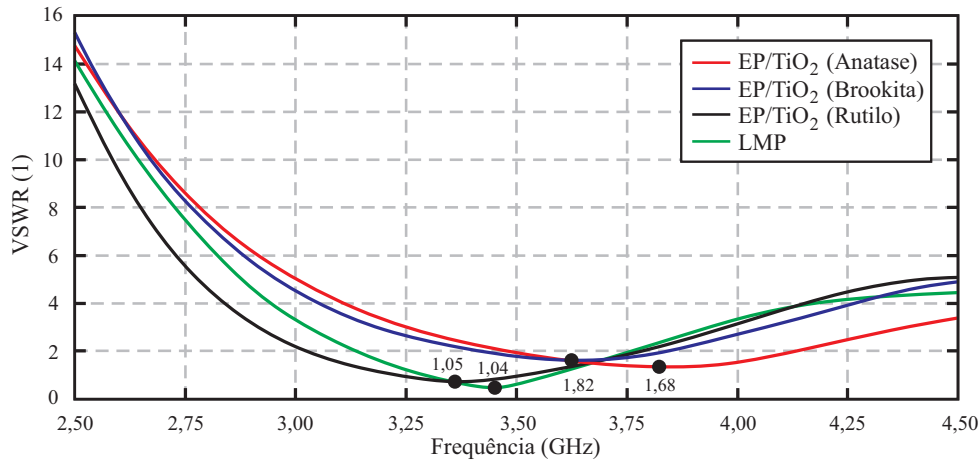
Os resultados encontrados mostram valores de resistência e reatância para o LMP e fase Rutilo muito próximos ao ideal, além de apresentar largura de banda ampla com valor de 0,635 GHz, operante no ponto de 3,36 GHz o modelo de antena também apresentou bom coeficiente de reflexão como mostra a Figura 14 e Tabela 11. Os valores de resistência e reatância estão de acordo com o esperado, para resistência, o valor de 50 ou muito próximo e para reatância valor igual a zero ou muito próximo. O compósito com fase rutilo se destacou entre as demais fases, apresentando melhores resultados, comprovando singela mudança conforme fase cristalina.

Tabela 11 – Resultados e parâmetros de antena e RF para os materiais.

Fase dispersa	Frequência (GHz)	Resistência ($Re\Omega$)	Reatância ($Im\Omega$)	S_{11} (dB)	Largura de banda (GHz)	Ganho (dB)
Anatase	3,82	47,64	25,37	-11,9537	0,360	5,81
Brookita	3,63	32,36	17,01	-16,9536	0,536	5,92
Rutilo	3,36	49,22	0,67	-32,9997	0,635	5,81
LMP	3,43	50,80	1,74	-34,4080	0,480	6,14

As diferenças observadas entre as fases cristalinas de TiO_2 Anatase, Brookita e Rutilo na matriz (fase contínua), podem ser relacionadas às suas estruturas cristalinas distintas. A fase Rutilo, por possuir uma estrutura tetragonal mais densa e simétrica, apresenta maior constante dielétrica e maior condutividade, o que favorece a propagação e acoplamento da onda eletromagnética, refletindo em menor reatância ($0,67\ \Omega$) e melhor correspondência de impedância ($S_{11} : -32,99\ \text{dB}$), além de obter o $VSWR$ mais próximo ao ideal (≈ 1).

Figura 15 – Reflexão de ondas em antena (VSWR) (Autor, 2025).



A Brookita, com estrutura ortorrômbica menos estável, exibe parâmetros intermediários, como menor resistência. Já a Anatase, com estrutura mais aberta e menor densidade de empacotamento atômico, resulta em maior resistência e reatância, além de menor largura de banda, indicando perdas maiores e menor eficiência no desempenho da antena.

Com base na simulação, o EP/TiO₂ (Rutilo), superou a casa dos 94% de eficiência de radiação, o que mostra que a energia de excitação foi irradiada e houveram poucas perdas prejudiciais ao desempenho da antena, a Tabela 12 e Tabela 13 trazem um apanhado geral dos resultados para todos os materiais utilizados.

Tabela 12 – Parâmetros gerais de desempenho das antenas simuladas.

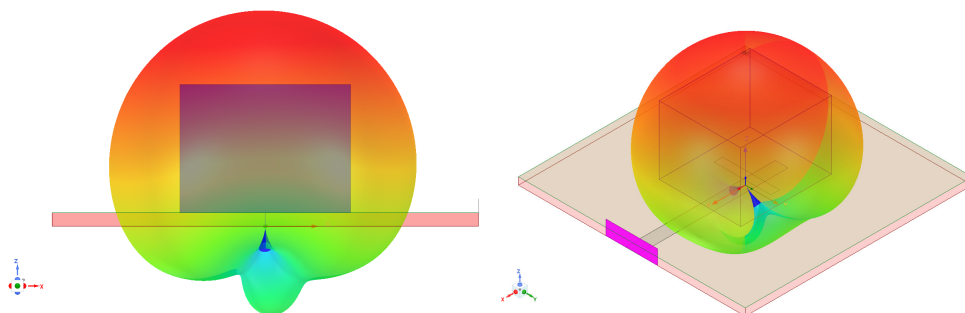
Parâmetro	Anatase	Brookita	Rutilo	LMP
Max U (mW/sr)	283,97	305,03	303,34	327,43
Diretividade máxima	4,279	4,165	4,040	4,442
Ganho máximo	3,812	3,912	3,814	4,116
Ganho realizado máximo	3,569	3,833	3,812	4,115
Ganho de sistema máximo	356,85	383,33	381,20	411,47
Potência irradiada (mW)	833,93	920,37	943,55	926,41
Potência aceita (mW)	936,23	979,83	999,37	999,64
Potência incidente (W)	1,000	1,000	1,000	1,000
Potência do sistema (mW)	10,000	10,000	10,000	10,000
Eficiência de radiação	0,891	0,939	0,944	0,927
Eficiência total	0,834	0,920	0,944	0,926
Eficiência do sistema (%)	83,39	92,04	94,35	92,64
Relação frente-costas (F/B) (dB)	17,60	15,54	10,74	28,57
Fator de decaimento	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 13 – Valor do campo elétrico resultante por componente, com direção correspondente.

Componente	Anatase	Brookita	Rutilo	LMP
Total (V)	14,63	15,17	15,12	15,71
X (V)	14,62	15,16	15,12	15,71
Y (V)	3,04	3,19	3,29	3,18
Z (V)	7,68	8,03	7,99	8,33
ϕ (V)	14,62	15,16	15,12	15,71
θ (V)	14,63	15,17	15,12	15,71
LHCP (V)	10,36	10,73	10,71	11,10
RHCP (V)	10,34	10,72	10,68	11,12
Componente copolarizada (V)	14,63	15,17	15,12	15,71
Componente cruzada (V)	3,49	3,84	4,61	2,93

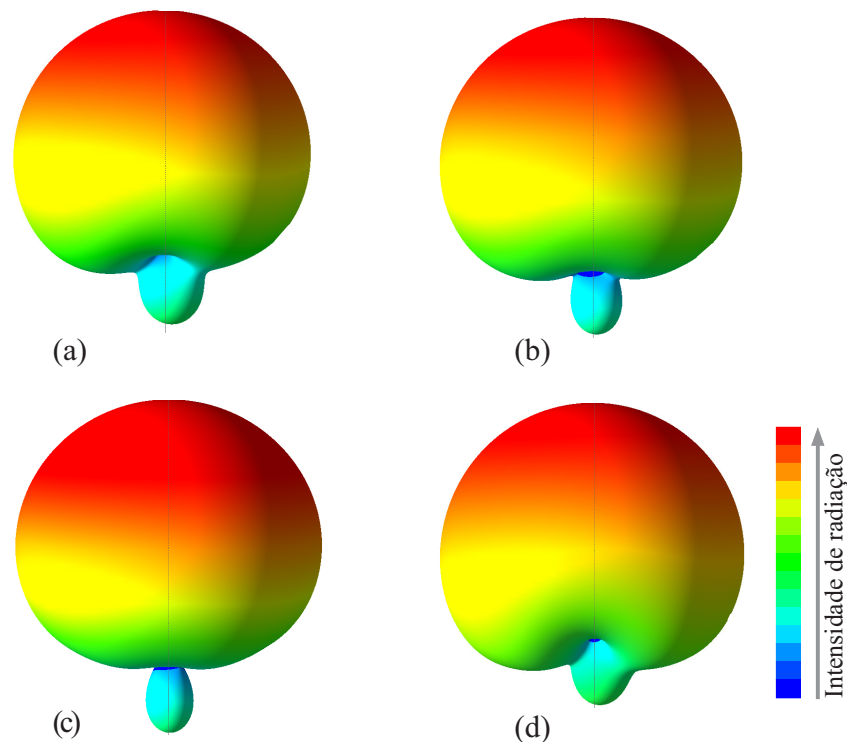
A antena com o Fosfato LMP apresentou os melhores resultados globais entre todas as opções testadas. Dentre os principais parâmetros que comprovam esse desempenho, destacam-se a maior diretividade (4,442) e maior ganho realizado (4,115 dB), o que indica uma eficiência superior na concentração e transmissão da energia radiada, maior valor de Max U (327,43 mW/sr), reforçando sua capacidade de radiação, maior campo elétrico total (15,71 V) e menor componente cruzada (2,93 V), o que sugere boa polarização e mínima interferência, maior relação frente-costas (28,57 dB), indicando que a antena irradia de forma muito mais eficiente para frente do que para trás, alta eficiência total (92,6%) e eficiência de radiação (92,7%), valores considerados muito bons para a aplicação proposta, com baixas perdas. A fase Rutilo também teve bom desempenho, com eficiência total levemente superior (94,4%) e boa potência irradiada, mas singela em comparação ao LMP na diretividade, ganho e F/B, ainda assim sendo uma opção viável em comparação com um fosfato multi-fases. A Brookita se mostrou intermediário e a Anatase teve o desempenho mais modesto em quase todos os parâmetros.

Figura 16 – Padrão de radiação, indicação de emissão direcional com lóbulo frontal mais evidente (relação F/B) para antena com LMP (Autor, 2025).



A variação das fases como reforço no compósito mostram componentes de campo parecidas, sendo o ganho muito similar entre o Compósito polimérico-cerâmico com Anatase, Brookita e Rutilo dispersos na resina epóxi. Havendo pouca variação entre os materiais, até mesmo entre o LMP e demais fases do TiO_2 , os lóbulos e feixes da antena ficaram muito parecidos conforme exemplifica a Figura 17.

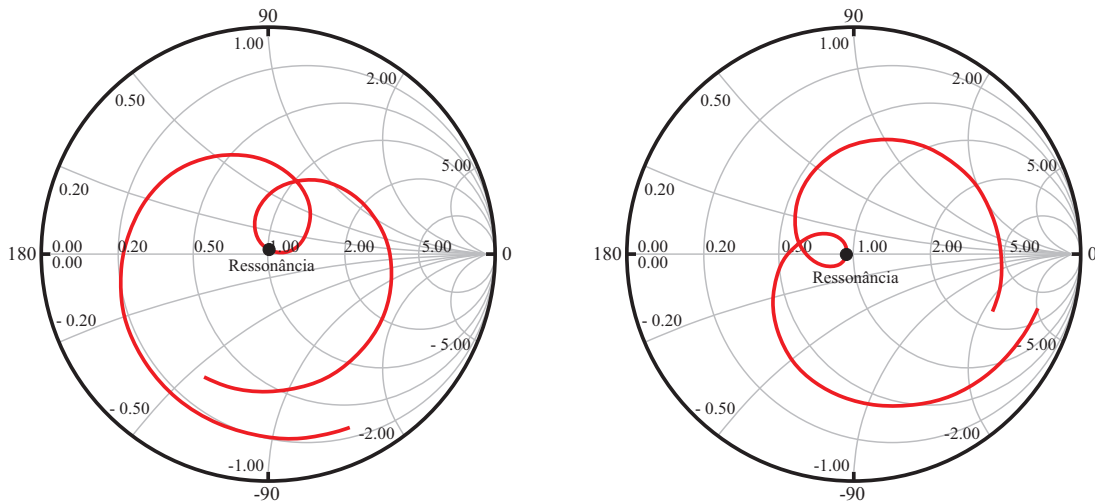
Figura 17 – Padrão de radiação, exemplificação do padrão de emissão de sinal da antena para os dois materiais, EP/ TiO_2 (Anatase, Brookita e Rutilo) (a), (b) e (c) respectivamente e Fosfato LMP (d) (Autor, 2025).



O Gráfico de Smith é uma ferramenta utilizada em engenharia eletromagnética para visualizar e analisar a impedância de uma carga (como uma antena) em função da frequência. A Figura 18 mostra o gráfico para os dois modelos de antena que apresentaram resultados mais próximos ao ideal, para o Compósito EP/ TiO_2 (fase rutilo) e o Fosfato LMP.

A parte real da impedância normalizada (RK) em ambos os casos está relativamente próxima de 1 no ponto de ressonância. Para o EP/ TiO_2 (rutilo), $RK: 0.3531 + j0.0143$ e para o LMP, $RK: 1.0160 - j0.3349$. Isso indica que a resistência da carga está próxima da impedância característica do sistema (geralmente 50 ohms), o que é importante para uma boa transferência de potência. O EP/ TiO_2 (rutilo) apresenta uma parte real mais distante de 1, mas uma reatância muito pequena, resultando em uma reflexão menor ($|\Gamma| = 0,2251$), já o LMP tem uma parte real muito próxima de 1, o que seria ideal, mas possui uma reatância capacitiva considerável, levando a uma reflexão maior ($|\Gamma| = 0,6160$).

Figura 18 – Gráfico de Smirt para o Compósito EP/TiO₂ (Rutilo) e o Fosfato LMP, casamento de impedâncias e comparativos (Autor, 2025).



Portanto, embora ambos os casos tenham a parte real próxima de 1, o Compósito de fase Rutilo, paradoxalmente, apresenta um casamento de impedância melhor na frequência de ressonância devido à menor magnitude da reatância, resultando em menos energia refletida.

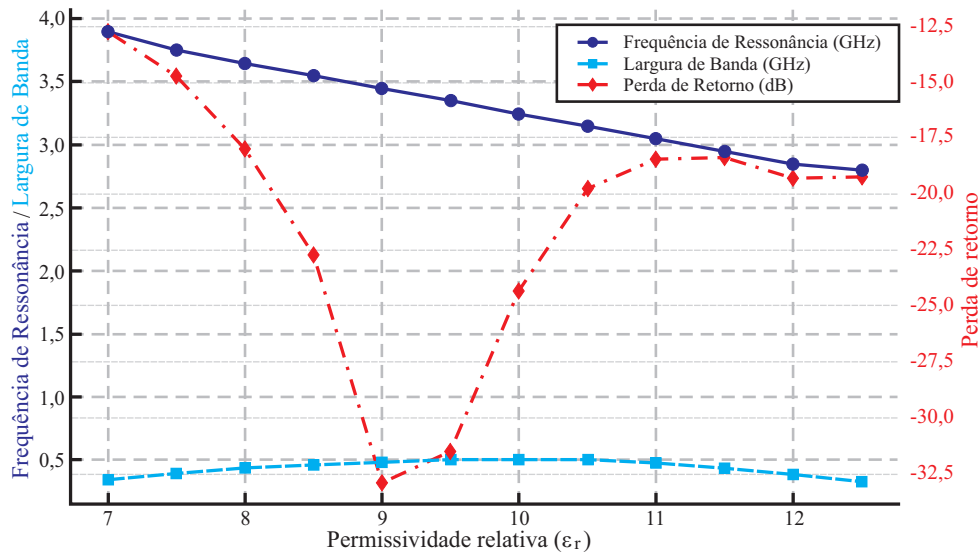
Essas respostas estão de acordo com o esperado, pois o rutilo é um material cerâmico com alta constante dielétrica e baixa perda, enquanto a resina epóxi, sendo um polímero isolante, contribui para reduzir variações abruptas no comportamento dielétrico. Por outro lado, o comportamento do LMP pode ser atribuído à natureza fortemente iônica das fases desse material, que tendem a gerar respostas capacitivas expressivas.

5.2.1 Multifuncionalidade

A proposta de uma antena multifuncional, com ampla operacionalidade foi alcançada para o material composto EP/TiO₂ (Rutilo), com resultados de simulação foi observado a capacidade de operação da antena em um *range* de valores de permissividade, isto é, conforme houve variação da constante dielétrica o modelo de antena operou em diferentes pontos de frequência (espectro eletromagnético).

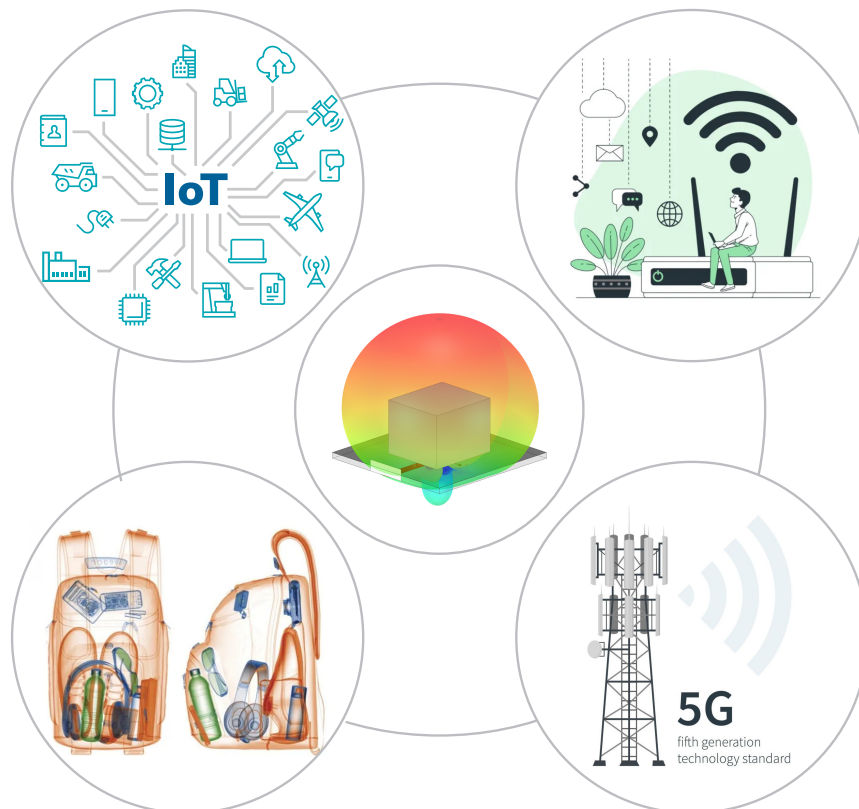
Outra característica a se notar em função de operacionalidade foi a capacidade de um único modelo de antena (ver Figura 13) ser funcional para os dois materiais (EP/TiO₂ (multi-fases) e LMP), sendo capaz de operar em diferentes pontos de ressonância e com diferentes materiais constituintes no ressonador. Isso muito se deve a proximidade de valores de constante dielétrica quanto ao modelamento matemático robusto, contudo, ainda havendo certas disparidades evidenciadas pelo descasamento de impedâncias e valores de VSWR muito maiores que 1 (Compósito EP/TiO₂ (Anatase) e (Brookita)).

Figura 19 – Range de valores operacionais da antena com Compósito EP/TiO₂ (Rutilo) (Autor, 2025).



A multifuncionalidade para este modelo, não se limita apenas na operacionalidade, mas também aplicabilidade, haja visto que a antena apresenta características próprias para diversas aplicações como *Wireless*, 5G, 6G, Iot e imageamento, isto muito devido a resposta eletromagnética ajustável por % de carga no Compósito EP/TiO₂. O tamanho reduzido proporciona versatilidade e os resultados observados comprovam a aplicação.

Figura 20 – Aplicações da antena (Adaptado de [71, 72, 73]).



Outras aplicações possibilitadas são tecnologias inovadoras tanto no campo do eletromagnetismo como de materiais (Tabela 14)

Tabela 14 – Aplicações avançadas para a antena proposta.

Área	Aplicação/Inovação
6G / Redes Reconfiguráveis	Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (RIS), ambientes adaptativos e comunicações milimétricas emergentes.
Sensoriamento Inteligente	Dispositivos biomédicos e sensores ambientais para monitoramento remoto.
IA na Engenharia de RF	Integração com algoritmos de inteligência artificial para otimização e ajuste dinâmico de antenas.
Metamateriais e Compósitos Funcionais	Exploração do impacto de diferentes fases cristalinas de TiO_2 em ressonadores para aplicações eletromagnéticas.
IoT Avançado e Comunicação M2M	Comunicação industrial, sensoriamento distribuído, ambientes com IoT 2.0

Tabela 15 – Comparativo de antenas e trabalhos similares.

Antena	Freq. (GHz)	S_{11} (dB)	BW (GHz)	Ganho (dB)	Área (cm)	Ref.
SRR	2,5	-22,5	0,082	—	~ 1,8	[74]
SWAA	23,3	< -10	6,0	~12	—	[75]
UWB-MIMO	6,0	< -10	~10	—	~ 5	[76]
Patch	3,5	< -23	1,6	6,28	~ 17,8	[77]
RDRA/(EP/ TiO_2 - Rutilo)	3,36	-32,99	0,635	5,81	≤ 4	Autor
RDRA (LMP)	3,43	-34,41	0,480	6,14	≤ 4	Autor

A antena desenvolvida neste trabalho apresenta desempenho superior em relação aos trabalhos da literatura, especialmente no parâmetro de retorno (S_{11}), indicando excelente adaptação de impedância. Comparada à antena com SRR, que possui banda estreita (0,082 GHz), a antena proposta oferece largura de banda significativamente maior, mantendo dimensões compactas. Em relação às antenas com SWAA e UWB-MIMO, embora estas apresentem maior largura de banda, utilizam estruturas mais complexas e volumosas. A proposta atual combina simplicidade construtiva, bom ganho e miniaturização, sendo altamente competitiva para aplicações em 5G Sub-6 GHz.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

O modelo de antena proposto neste trabalho atingiu com êxito os objetivos estabelecidos, demonstrando-se funcional, robusto e versátil frente à variação dos materiais constituintes do ressonador. A metodologia aplicada, composta por levantamento bibliográfico, análises computacionais, simulações eletromagnéticas e implementação em ambiente virtual, foi eficaz e eficiente. Cada etapa do processo contribuiu para o "afunilamento" dos parâmetros e resultados, permitindo uma definição clara dos valores e *inputs* necessários para o desempenho ideal da antena e avaliação dos materiais utilizados.

A multifuncionalidade projetada foi alcançada, tanto no aspecto funcional quanto operacional, possibilitando aplicações em múltiplas bandas e contextos eletromagnéticos e permissivos. Dentre os materiais analisados, o compósito epóxi com dióxido de titânio (EP/TiO₂), na fase rutilo, destacou-se como maior capacidade, especialmente no que diz respeito ao casamento de impedâncias, eficiência, estabilidade dielétrica e adaptação a diferentes faixas de constante dielétrica. A estrutura cristalina do rutilo, mostrou-se ideal para aplicações em radiofrequência e antenas, otimizando a resposta eletromagnética do sistema.

Paralelamente, o Fosfato LMP, também um compósito multi-fases, demonstrou propriedades satisfatórias, equiparando-se em vários aspectos ao EP/TiO₂ (rutilo) e em alguns resultados até o superando, com tudo, com a desvantagem de apresentar uma síntese mais elaborada e complexa. Ainda que não tenha alcançado o mesmo desempenho máximo em todos os critérios, o LMP é uma alternativa promissora em RF.

Outro ponto de destaque foi a influência evidente das diferentes fases cristalinas do TiO₂ na resposta eletromagnética do sistema. Embora a fase rutilo tenha se destacado em termos de desempenho para antenas operando em RF, as fases anatase e brookita também demonstraram potencial significativo, apresentando resultados promissores que indicam possibilidades de otimização por meio de engenharia de materiais, ajustes estruturais e variação da concentração de carga. Vale ressaltar que, neste trabalho, a proporção de dióxido de titânio foi definida entre 25 e 30% em peso.

Os resultados obtidos validam a viabilidade do modelo proposto, tanto em termos de projeto, materiais aplicados quanto de aplicação e funcionalidade atual. O uso de materiais dielétricos avançados e compósitos multifásicos, aliado a uma abordagem metodológica integrada, permitiu alcançar uma antena multifuncional com bom desempenho, adaptabilidade e aplicabilidade em diferentes cenários de operação.

6.2 Propostas Futuras

Como objetivos para trabalhos futuros, realizar a síntese e análise física dos materiais, sintetizar o compósito polimérico-cerâmico e avaliar comparativamente os resultados simulados e de modelos teóricos com resultados de medição, fabricar a antena e aplicá-la na operação e função proposta.

6.3 Produções Acadêmicas Vinculadas ao Projeto

Durante o desenvolvimento deste trabalho, o autor participou da produção e publicação dos seguintes trabalhos técnico-científicos correlatos ao tema abordado:

- SANTOS, Marcos G. F. dos; MIRANDA, Igor R. S.; SOUSA, Fiterlinge M.; SOUSA, Fábio B. de; COSTA, Marcos B. C. *Materials Applied to Rectangular Dielectric Resonator Antenna (RDRA) Targeting 5G Applications*. In: **SEMINATEC 2024 – XVIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology**, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 18–19 abr. 2024. ISBN: 978-65-01-03636-6.
Disponível em: <https://www.psi.poli.usp.br/seminatec2024/Program.html>
- MIRANDA, Igor R. S.; SANTOS, Marcos G. F.; SOUZA, Fiterlinge M.; SOUSA, Fábio B. de; COSTA, Marcos B. C.; PASCHOAL JR., Waldomiro. *Dielectric resonator antenna with graphene layer and NMP structure for THz applications*. **Physica Scripta**, v. 99, n. 6, p. 065548, 2024.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad49e3>
- SILVA, Alan dos R.; SOUSA, Fábio B. de; ARAÚJO, Fábio S. de; OLIVEIRA, Jorge E. de; SANTOS, Marcos G. F. dos; COSTA, Marcos B. C. *Study of a Two-Dimensional Photonic Crystal Demultiplexer Based on Graphene*. In: **SEMINATEC 2024 – XVIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology**, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 18–19 abr. 2024. ISBN: 978-65-01-03636-6.
Disponível em: <https://www.psi.poli.usp.br/seminatec2024/Program.html>

REFERÊNCIAS

- [1] X. Lin e N. Lee. "Introduction to 5G and Beyond". Em: *5G and Beyond: Fundamentals and Standards* (2021), pp. 1–25 (ver p. 19).
- [2] D. M. Sullivan. *Electromagnetic simulation using the FDTD method*. John Wiley & Sons, 2013 (ver p. 19).
- [3] M. G. F. SANTOS. *Simulação numérica de uma Antena Ressonadora Dielétrica (DRA) baseada em Si, Ag e grafeno para aplicações em espectro THz*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Pará, Belém, 2023. 71 p. 2023 (ver p. 19).
- [4] Y. Zhang et al. "Advanced Dielectric Resonator Antenna Technology for 5G and 6G Applications". Em: *Sensors* 24.5 (2024), p. 1413 (ver p. 19).
- [5] K. Surendran e R. Uvic. "Perovskites". Em: *Microwave Materials and Applications 2V Set* (2017), pp. 81–148 (ver pp. 19, 48).
- [6] D. Wang et al. "Cold sintered LiMgPO₄ based composites for low temperature co-fired ceramic (LTCC) applications". Em: *Journal of the American Ceramic Society* 103.11 (2020), pp. 6237–6244 (ver pp. 19, 38, 48).
- [7] G. Marconi. *Transatlantic Wireless Communication*. Historical Archive, 1901 (ver p. 20).
- [8] J. Brown. *History of Wireless*. Wiley, 1997 (ver p. 20).
- [9] F. Yonezawa. "Molecular Dynamics Simulations". Em: *Solid State Sciences* 103 (1990) (ver p. 20).
- [10] M. H. Kalos e P. A. Whitlock. *Monte carlo methods*. John Wiley & Sons, 2009 (ver p. 20).
- [11] J. C. Curlander e R. N. McDonough. *Synthetic aperture radar*. Vol. 11. Wiley, New York, 1991 (ver p. 20).
- [12] R. Richtmyer. "Dielectric resonators". Em: *Journal of applied physics* 10.6 (1939), pp. 391–398 (ver pp. 21, 26, 27, 32, 48).
- [13] M. McAllister, S. A. Long e G. Conway. "Rectangular dielectric resonator antenna". Em: *Electronics letters* 19 (1983), p. 218 (ver pp. 21, 25, 27).
- [14] S. Long, M. McAllister e L. Shen. "The resonant cylindrical dielectric cavity antenna". Em: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 31.3 (1983), pp. 406–412 (ver pp. 21, 23–26).
- [15] A. Gaya et al. "Dual band circularly polarized rectangular dielectric resonator antenna for millimeter wave 5G applications". Em: *2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*. IEEE. 2019, pp. 1–5 (ver p. 21).

- [16] H. B. Bafrooei et al. "Ca₃MgSi₂O₈: Novel low-permittivity microwave dielectric ceramics for 5G application". Em: *Materials Letters* 263 (2020), p. 127248 (ver p. 21).
- [17] S. Anand, G. Bharti e A. Sharma. "Two-Element Composite Dielectric Resonator-Based MIMO Antenna for WLAN and WiMAX Application". Em: *Recent Trends in Electronics and Communication: Select Proceedings of VCAS 2020*. Springer. 2022, pp. 815–823 (ver p. 21).
- [18] D. Bishara et al. "A state-of-the-art review on machine learning-based multiscale modeling, simulation, homogenization and design of materials". Em: *Archives of computational methods in engineering* 30.1 (2023), pp. 191–222 (ver p. 21).
- [19] Y. Ye et al. "Dielectric constant prediction of perovskite microwave dielectric ceramics via machine learning". Em: *Materials Today Communications* 35 (2023), p. 105733 (ver p. 21).
- [20] Y. Shi et al. "Multi-frequency composite wearable antenna for wireless communications". Em: *Smart Materials and Structures* 33.6 (2024), p. 067002 (ver p. 21).
- [21] K. M. Luk. "Dielectric resonator antennas". Em: *Research Studies Pr.* (2003) (ver pp. 23–27, 30–32, 48).
- [22] C. A. Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016 (ver pp. 23–26, 30, 48).
- [23] X. Fang e K. Leung. "Designs of single-, dual-, wide-band rectangular dielectric resonator antennas". Em: *IEEE transactions on antennas and propagation* 59.6 (2011), pp. 2409–2414 (ver pp. 25, 27, 28).
- [24] S. Pandey et al. "Design and development of dielectric resonator antenna using ceramic materials: an overview". Em: *Transactions of the Indian Institute of Metals* 72 (2019), pp. 2019–2028 (ver p. 27).
- [25] I. R. Miranda et al. "Dielectric resonator antenna with graphene layer and NMP structure for THz applications". Em: *Physica Scripta* 99.6 (2024), p. 065548 (ver p. 28).
- [26] A. Petosa. *Dielectric resonator antenna handbook*. Artech, 2007 (ver pp. 28, 30–32, 48).
- [27] M. Mrnka et al. "Millimetre-wave dielectric resonator antenna array based on directive LTCC elements". Em: *IET microwaves, antennas & propagation* 12.5 (2018), pp. 662–667 (ver p. 29).
- [28] R. K. Mongia e A. Ittipiboon. "Theoretical and experimental investigations on rectangular dielectric resonator antennas". Em: *IEEE Transactions on antennas and propagation* 45.9 (1997), pp. 1348–1356 (ver pp. 32, 48).

- [29] R. S. Yaduvanshi e Nishtha. “Conical dielectric resonator antenna for terahertz applications”. Em: *Frequenz* 75.5-6 (2021), pp. 211–220 (ver pp. 32, 48).
- [30] A. R. Von Hippel e S. Morgan. “Dielectric materials and applications”. Em: *Journal of The Electrochemical Society* 102.3 (1955), 68Ca (ver pp. 33, 34).
- [31] J. Martinez-Vega. *Dielectric materials for electrical engineering*. John Wiley & Sons, 2013 (ver pp. 33, 34).
- [32] W. R. CALLISTER. “DG; ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 9”. Em: *Ed. Rio de Janeiro: LTC* (2016) (ver p. 33).
- [33] G. Wang et al. “Electroceramics for high-energy density capacitors: current status and future perspectives”. Em: *Chemical Reviews* 121.10 (2021), pp. 6124–6172 (ver p. 34).
- [34] J. N. Sahalos e G. A. Kyriacou. *Tunable Materials with Applications in Antennas and Microwaves*. Springer Nature, 2022 (ver p. 34).
- [35] J. Varghese et al. “Microwave materials for defense and aerospace applications”. Em: *Handbook of advanced ceramics and composites: defense, security, aerospace and energy applications* (2020), pp. 165–213 (ver p. 34).
- [36] H. P. P. V. Shanmugasundram, E. Jayamani e K. H. Soon. “A comprehensive review on dielectric composites: Classification of dielectric composites”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157 (2022), p. 112075 (ver p. 34).
- [37] S. Singha e M. J. Thomas. “Dielectric properties of epoxy nanocomposites”. Em: *IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 15.1 (2008), pp. 12–23 (ver p. 34).
- [38] Y. Jia et al. “The dielectric properties and thermal conductivities of epoxy composites reinforced by titanium dioxide”. Em: *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* 32.4 (2022), pp. 1206–1212 (ver pp. 34, 36).
- [39] M. Orselly et al. “Molecular simulations of thermomechanical properties of epoxy-amine resins”. Em: *ACS omega* 7.34 (2022), pp. 30040–30050 (ver p. 35).
- [40] C. Verma et al. “Epoxy resins as anticorrosive polymeric materials: A review”. Em: *Reactive and Functional Polymers* 156 (2020), p. 104741 (ver p. 35).
- [41] Hexion Specialty Chemicals. *EPON™ Resin 828 Technical Bulletin*. Reissued September 2005. 2005. URL: <https://www.hexion.com> (ver p. 36).
- [42] Huntsman Corporation. *Triethylenetetramine (TETA) Technical Bulletin*. 2007. URL: <https://www.huntsman.com> (ver p. 36).
- [43] X. Chen e A. Selloni. *Introduction: titanium dioxide (TiO₂) nanomaterials*. 2014 (ver pp. 36, 37).

- [44] M. Tsega Yihunie. "Effect of temperature sintering on grain growth and optical properties of TiO₂ nanoparticles". Em: *Journal of Nanomaterials* 2023.1 (2023), p. 3098452 (ver p. 37).
- [45] S.-D. Mo e W. Ching. "Electronic and optical properties of three phases of titanium dioxide: Rutile, anatase, and brookite". Em: *Physical review B* 51.19 (1995), p. 13023 (ver p. 38).
- [46] A. Thilagam, D. Simpson e A. Gerson. "A first-principles study of the dielectric properties of TiO₂ polymorphs". Em: *Journal of Physics: Condensed Matter* 23.2 (2010), p. 025901 (ver p. 38).
- [47] A. Wypych et al. "Dielectric properties and characterisation of titanium dioxide obtained by different chemistry methods". Em: *Journal of Nanomaterials* 2014.1 (2014), p. 124814 (ver pp. 38, 48).
- [48] Z. Weng et al. "Low temperature sintering and microwave dielectric properties of TiO₂ ceramics". Em: *Journal of the European Ceramic Society* 37.15 (2017), pp. 4667–4672 (ver p. 38).
- [49] M. Iliev, V. Hadjiev e A. Litvinchuk. "Raman and infrared spectra of brookite (TiO₂): experiment and theory". Em: *Vibrational spectroscopy* 64 (2013), pp. 148–152 (ver p. 38).
- [50] L. Sahoo et al. "Structural, dielectric, and impedance spectroscopy investigation of titanium dioxide electronic system". Em: *Materials Today: Proceedings* 67 (2022), pp. 1159–1163 (ver p. 38).
- [51] J. Bonkerud et al. "On the permittivity of titanium dioxide". Em: *Scientific reports* 11.1 (2021), p. 12443 (ver p. 38).
- [52] J. Lv et al. "Effects of Li⁺ enrichment on the structure and microwave dielectric properties of LiMgPO₄ ceramics". Em: *Ceramics International* 49.23 (2023), pp. 37245–37252 (ver p. 38).
- [53] B. D. Lee et al. "Microwave dielectric properties of CaTiO₃ and MgTiO₃ thin films". Em: *Japanese journal of applied physics* 42.9S (2003), p. 6158 (ver p. 38).
- [54] A. Pashkin et al. "High frequency dielectric properties of CaTiO₃-based microwave ceramics". Em: *Journal of Physics D: Applied Physics* 38.5 (2005), p. 741 (ver p. 38).
- [55] M. Ma et al. "5G microstrip patch antenna and microwave dielectric properties of cold sintered LiWVO₆-K₂MoO₄ composite ceramics". Em: *Ceramics International* 47.13 (2021), pp. 19241–19246 (ver p. 38).

- [56] J. G. Bazarova et al. "Synthesis of new triple molybdates $K_5RZr(MoO_4)_6$ ($R = Al, Cr, Fe, In, Sc$) in the $K_2MoO_4-R_2(MoO_4)_3-Zr(MoO_4)_2$ systems, their structure and electrical properties". Em: *Journal of Alloys and Compounds* 741 (2018), pp. 834–839 (ver p. 38).
- [57] R. L. Parker. "Zur Kristallstruktur von Anastas und Rutil. (II. Teil. Die Anastasstruktur)". Em: *Zeitschrift für Kristallographie, Kristallgeometrie, Kristallphysik, Kristallchemie* 59 (1924), pp. 1–54. URL: <https://www.crystallography.net/1010942.html> (ver p. 41).
- [58] Materials Project. *mp-390: TiO₂ (Tetragonal, I₄/amd, 141)*. 2020. URL: <https://materialsproject.org/materials/mp-390> (ver p. 41).
- [59] E. P. Meagher e G. A. Lager. "Polyhedral thermal expansion in the TiO₂ polymorphs: Refinement of the crystal structures of rutile and brookite at high temperature". Em: *The Canadian Mineralogist* 17 (1979), pp. 77–85. URL: <https://www.crystallography.net/cod/9004139.html> (ver p. 41).
- [60] Materials Project. *mp-1840: TiO₂ (Orthorhombic, Pbc_a, 61)*. 2020. URL: <https://materialsproject.org/materials/mp-1840> (ver p. 41).
- [61] E. P. Meagher e G. A. Lager. "Polyhedral thermal expansion in the TiO₂ polymorphs: Refinement of the crystal structure of rutile and brookite at high temperature". Em: *The Canadian Mineralogist* 17 (1979), pp. 77–85. URL: <https://www.crystallography.net/9004141.html> (ver p. 42).
- [62] Materials Project. *mp-2657: TiO₂ (Tetragonal, P₄₂/mnm, 136)*. 2020. URL: <https://materialsproject.org/materials/mp-2657> (ver p. 42).
- [63] J. Flippen-Anderson e R. Gilardi. "Diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)". Em: *Structural Science* 37.7 (1981), pp. 1433–1435 (ver p. 43).
- [64] PubChem. *Bisphenol A diglycidyl ether* | C₂₁H₂₄O₄, CID 2286. 2020. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Bisphenol-A-diglycidyl-ether> (ver p. 43).
- [65] R. A. Schoonheydt et al. "Complexes of diethylenetriamine (dien) and tetraethylenepentamine (tetren) with Cu (II) and Ni (II) on hectorite". Em: *Clays and Clay Minerals* 27.4 (1979), pp. 269–278 (ver p. 43).
- [66] PubChem. *Tetraethylenepentamine* | C₈H₂₃N₅, CID 8197. 2020. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Tetraethylenepentamine> (ver p. 43).
- [67] F. González-García, E. Miguez e B. G. Soares. "Caracterização do sistema éter diglicídico do bisfenol A/poliaminas alifáticas". Em: *Polímeros* 15 (2005), pp. 261–267 (ver p. 44).

- [68] C. R. Amaral et al. “Mechanical properties of DGEBA/TEPA modified epoxy resin”. Em: *Materials Science Forum*. Vol. 775. Trans Tech Publ. 2014, pp. 588–592 (ver p. 44).
- [69] The MathWorks, Inc. *MATLAB: The Language of Technical Computing*. Versão R2023a. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. 2023. URL: <https://www.mathworks.com> (ver pp. 46, 48).
- [70] Ansys Inc. *ANSYS HFSS: High Frequency Structure Simulator*. Versão 2023 R1. Canonsburg, PA: Ansys Inc. 2023. URL: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> (ver p. 49).
- [71] Airport Guys. *Ever wondered how an airport scanner works? Here's what you need to know*. Acessado em: 1 maio 2025. URL: <https://www.electronicproducts.com/ever-wondered-how-an-airport-scanner-works-heres-what-you-need-to-know/> (ver p. 55).
- [72] ITAMCO. *Internet of Things - Smart and Connected Manufacturing*. Acessado em: 1 maio 2025. URL: <https://itamco.com/technology/internet-of-things/> (ver p. 55).
- [73] Geek Conectado. *O que é Wireless? Entenda a Tecnologia Sem Fio*. Acessado em: 1 maio 2025. URL: <https://geekconectado.com.br/o-que-e-wireless-entenda-a-tecnologia-sem-fio/> (ver p. 55).
- [74] O. P. LAVOR e H. C. C. FERNADES. “Análise de SRR no Substrato de Antenas de Microfita”. Em: *Análise* 38.24 (2017) (ver p. 56).
- [75] A. C. S Jr. “Redes Celulares 5G e Desenvolvimento Nacional”. Em: *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação* 8.2 (2018), pp. 35–42 (ver p. 56).
- [76] M. S. Khan et al. “Ultra-wideband antenna with MIMO diversity for 5G wireless communication”. Em: *arXiv preprint arXiv:2007.02294* (2020) (ver p. 56).
- [77] M. Salehi e H. Oraizi. “Wideband high gain metasurface-based 4T4R MIMO antenna with highly isolated ports for sub-6 GHz 5G applications”. Em: *Scientific Reports* 14.1 (2024), p. 14448 (ver p. 56).

Apêndices

APÊNDICE A – NOTA SOBRE O USO DE IA

Este trabalho contou com o auxílio de uma ferramenta de Inteligência Artificial (IA) exclusivamente para fins de revisão gramatical, aprimoramento de coerência textual, fluidez, clareza e, pontualmente, tradução. Não houve geração de conteúdo original ou desenvolvimento de ideias por IA, sendo toda a autoria, argumentação e estrutura do texto de responsabilidade do autor. Contudo, em eventuais análises automatizadas, a escrita poderá apresentar resíduos/traços compatíveis com produções assistidas por IA, devido aos ajustes mencionados realizados por meio da ferramenta.

APÊNDICE B – PRÉ-CÓDIGO SIMULAÇÃO NUMÉRICA

```

clear;
clear all;

carga_frac = linspace(inserir valor);
% Variação da fração de carga
matriz_frac = 1 - carga_frac;
% A fração da matriz é o complemento da fração da carga

matriz_perm = inserir valor;
carga_perm = inserir valor;
calcularPermissividade \\
(matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm);

function calcularPermissividade \\
(matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm)
    % Verifica se a soma das frações volumétricas é igual a 1
    assert(all(matriz_frac + carga_frac == 1), \\
    'A soma das frações volumétricas deve ser igual a 1.');
```

```

    % Calcula a permissividade usando diferentes modelos
    mg_model = maxwellGarnett \\
    (matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm);
    lichtenecker_model = lichtenecker \\
    (matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm);
    js_model = jayasundereSmith \\
    (matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm);
    wiener_lower = wienerLower \\
    (matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm);
    bruggeman_model = bruggeman \\
    (matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm);
    hs_lower = hashinShtrikmanLower \\
    (matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm);
    %hs_upper = hashinShtrikmanUpper \\
    (matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm);
    lll_model = landauLifshitzLooyenga \\
    (matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm);
    rayleigh_model = rayleigh \\
```

```
(matriz_perm, carga_frac, carga_perm);
cm_model = clausiusMossotti \\  
(matriz_perm, carga_frac, carga_perm);

% Plotando os resultados
figure;
hold on;
plot(carga_frac * 100, mg_model, 'DisplayName', '\\  
'Maxwell-Garnett model');
plot(carga_frac * 100, lichtenecker_model, '\\  
'DisplayName', 'Lichtenecker model');
plot(carga_frac * 100, js_model, '\\  
'DisplayName', 'Jayasundere-Smith model');
plot(carga_frac * 100, wiener_lower, '\\  
'DisplayName', 'Wiener lower limit');
plot(carga_frac * 100, bruggeman_model, '\\  
'DisplayName', 'Symmetric Bruggeman model');
plot(carga_frac * 100, hs_lower, '--', '\\  
'DisplayName', 'Hashin-Shtrikman lower bound');
%plot(carga_frac * 100, hs_upper, '--', '\\  
'DisplayName', 'Hashin-Shtrikman upper bound');
plot(carga_frac * 100, lll_model, '\\  
'DisplayName', 'Landau-Lifshitz/Looyenga model');
plot(carga_frac * 100, rayleigh_model, '\\  
'DisplayName', 'Rayleigh model');
plot(carga_frac * 100, cm_model, '\\  
'DisplayName', 'Clausius-Mossotti model');
hold off;

% Configurando o gráfico
xlabel('Fração de carga TiO2 (%)');
ylabel('Permissividade do compósito DGEBA/TiO2');
title('Variação da permissividade do compósito \\  
com a fração de carga');
legend('show');
grid on;
end

% Funções para cada modelo:
```

```
function mg_model = maxwellGarnett \\
(~, matriz_perm, carga_frac, carga_perm)
    % Modelo de Maxwell-Garnett
    mg_model = matriz_perm .* \\
    ((carga_perm - matriz_perm) .* carga_frac ./ \\
    (carga_perm + 2 .* matriz_perm) + 1) ...
    ./ (1 - carga_frac .* (carga_perm - matriz_perm) \\
    ./ (carga_perm + 2 .* matriz_perm));
end

function lichtenecker_model = lichtenecker \\
(matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm)
    % Modelo de Lichtenecker
    lichtenecker_model = exp(carga_frac .* \\
    log(carga_perm) + matriz_frac .* log(matriz_perm));
end

function js_model = jayasundereSmith \\
(~, matriz_perm, carga_frac, carga_perm)
    % Modelo de Jayasundere-Smith
    A = matriz_perm .* (1 - carga_frac) + carga_perm .* \\
    carga_frac .* ...
    (3 .* matriz_perm ./ (carga_perm + 2 .* matriz_perm)) \\
    .* ... (1 + 3 .* carga_frac .* (carga_perm - matriz_perm) \\
    ./ (carga_perm + 2 .* matriz_perm));
    B = 1 - carga_frac + 3 .* carga_frac .* matriz_perm \\
    ./ (carga_perm + 2 .* matriz_perm) .* ...
    (1 + 3 .* carga_frac .* (carga_perm - matriz_perm) \\
    ./ (carga_perm + 2 .* matriz_perm));
    js_model = A ./ B;
end

function wiener_lower = wienerLower \\
(matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm)
    % Limite inferior de Wiener
    wiener_lower = (carga_perm .* matriz_perm) \\
    ./ (carga_frac .* matriz_perm + matriz_frac \\
    .* carga_perm);
```

end

```
function bruggeman_model = bruggeman \\  
(~, matriz_perm, carga_frac, carga_perm)  
    % Modelo de Bruggeman simétrico  
    temp = sqrt((1 - 3 .* carga_frac).^2 .* \\  
    carga_perm.^2 + ...  
        2 .* (2 + 9 .* carga_frac - 9 .* \\  
        carga_frac.^2) .* carga_perm .* matriz_perm + ...  
        (3 .* carga_frac - 2).^2 .* matriz_perm.^2);  
    bruggeman_model = (3 .* carga_frac .* \\  
    (carga_perm - matriz_perm) + 2 .* matriz_perm - \\  
    carga_perm + temp) / 4;
```

end

```
function hs_lower = hashinShtrikmanLower \\  
(~, matriz_perm, carga_frac, carga_perm)  
    % Limite inferior de Hashin-Shtrikman  
    hs_lower = matriz_perm + (3 * carga_frac .* \\  
    matriz_perm .* (carga_perm - matriz_perm)) ./ ...  
    (3 * matriz_perm + carga_frac .* \\  
    (carga_perm - matriz_perm));
```

end

```
%function hs_upper = hashinShtrikmanUpper \\  
(matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm)  
    % Limite superior de Hashin-Shtrikman  
    %hs_upper = carga_perm + (3 * matriz_frac .* \\  
    carga_perm .* (matriz_perm - carga_perm)) ./ ...  
    %(3 * carga_perm + matriz_frac .* \\  
    (matriz_perm - carga_perm));
```

%end

```
function lll_model = landauLifshitzLooyenga \\  
(matriz_frac, matriz_perm, carga_frac, carga_perm)  
    % Modelo de Landau-Lifshitz/Looyenga  
    lll_model = (matriz_frac .* matriz_perm.^(1/3) \\  
    + carga_frac .* carga_perm.^(1/3)).^3;
```

end

```
function rayleigh_model = rayleigh \\
(matriz_perm, carga_frac, carga_perm)
    % Modelo de Rayleigh
    rayleigh_model = matriz_perm + \\
    (3 * carga_frac .* matriz_perm .* \\
    (carga_perm - matriz_perm)) ./ ...
    (3 * matriz_perm + 2 * carga_frac .* \\
    (carga_perm - matriz_perm));
end
```

```
function cm_model = clausiusMossotti \\
(matriz_perm, carga_frac, carga_perm)
    % Modelo de Clausius-Mossotti
    cm_model = matriz_perm .* \\
    (1 + 3 .* carga_frac .* (carga_perm - matriz_perm) \\
    ./ (carga_perm + 2 .* matriz_perm)) ./ ...
    (1 - carga_frac .* (carga_perm - matriz_perm) \\
    ./ (carga_perm + 2 .* matriz_perm));
end
```