



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE CAMPUS FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

JORGE MENEZES ALVES

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE ANTENAS RESSADORAS
DIELÉTRICAS BASEADAS EM LaNbO_4 COM ADIÇÃO DE Bi_2O_3

FORTALEZA-CE

2025

JORGE MENEZES ALVES

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE ANTENAS RESSADORAS
DIELÉTRICAS BASEADAS EM LaNbO_4 COM ADIÇÃO DE Bi_2O_3

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Comunicações.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Sergio Bezerra Sombra.

Coorientador: Prof. Dr. João Paulo Costa do Nascimento.

FORTALEZA-CE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

ALVES, JORGE.

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE ANTENAS RESSADORAS
DIELÉTRICAS BASEADAS EM LaNbO_4 COM ADIÇÃO DE Bi_2O_3 / JORGE ALVES. -
2025.

91 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de
Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Antonio Sergio Bezerra Sombra.

Coorientação: Prof. Dr. João Paulo Costa do
Nascimento.

1. Cerâmica dielétrica. 2. Compósito LaNbO_4 ? Bi_2O_3 . 3. Propriedades dielétricas. 4.
DRA. 5. Simulação Numérica. I. Título.

CDD 621.382

JORGE MENEZES ALVES

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE ANTENAS RESSOADORAS
DIELÉTRICAS BASEADAS EM LaNbO_4 COM ADIÇÃO DE Bi_2O_3

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Comunicações.

Aprovado (a) em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Sergio Bezerra Sombra (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. João Paulo Costa do Nascimento (Coorientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza

Prof. Dr. Felipe Felix do Carmo

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Enilton Alves Nogueira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho à minha mãe Márcia, por seu amor inabalável e por ser minha base em todos os momentos.

Aos meus irmãos e sobrinhos, que me inspiram com afeto e alegria.

Aos amigos, próximos como irmãos e companheiros, que estiveram ao meu lado com amor, apoio, incentivo e amizade sincera. A todos vocês, minha profunda gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro por meio da concessão de bolsa de pesquisa científica, essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), expresso minha gratidão pelo ambiente acadêmico, pela infraestrutura oferecida e pelo convívio com professores e colegas que contribuíram para minha formação.

Ao Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM), onde a maior parte da pesquisa foi conduzida, agradeço pela disponibilidade de recursos, orientações técnicas e pelo apoio dos colegas pesquisadores, bem como ao meu coorientador e orientador, pelo acompanhamento, dedicação e orientação ao longo do processo.

À LCA Consulting e ao engenheiro Lenardo Castro, agradeço pelo apoio técnico e financeiro, pela cooperação e pelo tempo gentilmente disponibilizado.

Agradeço, ainda, à minha família, aos amigos próximos e a todos que, de alguma forma, estiveram presentes nesta jornada, oferecendo apoio moral e incentivo nos momentos mais desafiadores

**“A inteligência é a capacidade de se adaptar
à mudança.”**

— Stephen Hawking (2011, p. 21).

RESUMO

Neste trabalho, foi realizada a investigação das propriedades estruturais e dielétricas, bem como a aplicação dos compósitos de $\text{LaNbO}_4 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ como antenas ressoadoras dielétricas (DRAs). A síntese do ortoníobato de lantânio (LaNbO_4) foi conduzida através da reação no estado sólido e, após confirmada a obtenção dessa fase cerâmica, procedeu-se à adição mecânica de Bi_2O_3 em diferentes proporções de 2, 4, 6, 8, 10% em mol, visando a obtenção de compósitos. A adição de Bi_2O_3 teve como objetivo reduzir da temperatura de sinterização, preservando ou otimizando as propriedades dielétricas da fase LaNbO_4 (LNO). As caracterizações estruturais foram realizadas por difração de raios X (DRX) em todas as amostras, sendo o refinamento de Rietveld aplicado exclusivamente à fase LNO pura. Os resultados de Difração de Raios X (DRX) confirmaram a formação da fase monoclinica LaNbO_4 , e para os compósitos não foram observadas reações adicionais após a adição de óxido de bismuto (Bi_2O_3) na matriz LaNbO_4 . Quanto às propriedades dielétricas na região de micro-ondas, verificou-se que os compósitos apresentaram valores crescentes de permissividade relativa (ϵ'_r), com valor máximo de 14,79 para a amostra LNOB10. Em relação à tangente de perdas dielétricas ($\text{tg } \delta$), os materiais apresentaram perdas na ordem de 10^{-3} , com exceção da amostra LNOB2, que apresentou o menor valor de $\text{tg } \delta$, $8,70 \times 10^{-4}$. O coeficiente térmico da frequência de ressonância (τ_f) permaneceu positivo, indicando que não houve alterações significativas com a adição de Bi_2O_3 . Nas simulações, as curvas de coeficiente de reflexão (S_{11}), impedância real (Z') e imaginária (Z'') apresentaram excelente concordância com os resultados experimentais. Os parâmetros de campo distante mostraram diretividade acima de 4,91 dBi, ganho entre 4,88 e 5,57 dBi, e eficiência superior a 95%. Esses resultados validam o uso do LaNbO_4 adicionado de Bi_2O_3 como material promissor para antenas compactas operando na faixa de micro-ondas, com potencial aplicação em dispositivos de comunicação.

Palavras-chave: Cerâmica dielétrica; Compósito $\text{LaNbO}_4 - \text{Bi}_2\text{O}_3$; Propriedades dielétricas; DRA; Simulação Numérica.

ABSTRACT

In this work, the structural and dielectric properties, as well as the application of $\text{LaNbO}_4 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ composites as dielectric resonator antennas (DRAs), were investigated. The synthesis of lanthanum orthoniobate (LaNbO_4) was carried out by the solid-state reaction method and, after confirming the formation of this ceramic phase, mechanical addition of Bi_2O_3 was performed in different molar proportions of 2, 4, 6, 8, and 10%, aiming at obtaining composites. The addition of Bi_2O_3 aimed to reduce the sintering temperature while preserving or improving the dielectric properties of the LaNbO_4 (LNO) phase. Structural characterizations were performed by X-ray diffraction (XRD) on all samples, with Rietveld refinement applied exclusively to the pure LNO phase. XRD results confirmed the formation of the monoclinic LaNbO_4 phase, and no additional reactions were observed in the composites after Bi_2O_3 incorporation. Regarding the dielectric properties in the microwave range, the composites exhibited increasing relative permittivity (ϵ'_r), reaching a maximum value of 14.79 for the LNOB10 sample. The dielectric loss tangent ($\tan \delta$) remained on the order of 10^{-3} , with the LNOB2 sample showing the lowest value of 8.70×10^{-4} . The temperature coefficient of resonant frequency (τ_f) remained positive, indicating no significant changes with Bi_2O_3 addition. Simulated curves of reflection coefficient (S_{11}), real (Z') and imaginary (Z'') impedance showed excellent agreement with the experimental results. Far-field parameters demonstrated directivity above 4.91 dBi, gain between 4.88 and 5.57 dBi, and efficiency greater than 95%. These findings validate the potential of Bi_2O_3 -modified LaNbO_4 as a promising material for compact dielectric resonator antennas operating in the microwave frequency range, with potential applications in communication devices.

Keywords: Dielectric ceramics; $\text{LaNbO}_4 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ Composite; Dielectric properties; DRA; Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Representação esquemática da estrutura cristalina do LaNbO_4	23
Figura 2 — Propagação de uma onda eletromagnética ao atravessar a interface entre vácuo e dielétrico.....	33
Figura 3 — Relação esquemática entre estrutura cristalina, microestrutura e propriedades dielétricas em materiais cerâmicos.....	41
Figura 4 — Geometria esquemática de uma antena ressoadora dielétrica (DRA) cilíndrica montada sobre plano de terra metálico, com excitação por probe coaxial.....	46
Figura 5 — Exemplo ilustrativo de coeficiente de reflexão ($ S_{11} $) indicando a largura de banda (BW) de uma antena, definida entre os pontos em que $ S_{11} - 10\text{dB}$	47
Figura 6 — Aplicações emergentes de cerâmicas dielétricas.....	48
Figura 7 — Balança analítica Bioprecisa modelo FA2104N.....	51
Figura 8 — Frascos contendo óxido de lantânio (La_2O_3 – Vetec: 99,99% de pureza) e óxido de nióbio (Nb_2O_5 – Aldrich: 99,9% de pureza) utilizados na síntese da cerâmica fase LaNbO_4	52
Figura 9 — Esferas de óxido de zircônio (ZrO_2) utilizadas como meio moedor no processo de homogeneização e moagem dos pós cerâmicos (a esquerda) e recipiente de poliacetal utilizado no processo de moagem dos reagentes cerâmicos (a direita).....	53
Figura 10 — Moinho planetário Fritsch Pulverisette 5, com a câmara de moagem aberta.	53
Figura 11 — Forno resistivo da marca Jung.....	54
Figura 12 — Frasco de óxido de bismuto (Bi_2O_3) da marca Aldrich.	55
Figura 13 — Etapa de homogeneização das fases LaNbO_4 e Bi_2O_3 usando almofariz e pistilo de porcelana.....	56
Figura 14 — Molde metálico cilíndrico utilizado para prensagem uniaxial das amostras cerâmicas em pastilhas (esquerda). Prensa hidráulica da marca Apiguana utilizada na conformação uniaxial das pastilhas cerâmicas (direita).....	57
Figura 15 — Peça cerâmica de LNO prensada em formato cilíndrico, correspondente ao elemento ressoador da antena dielétrica, recém-retirada do molde metálico após conformação uniaxial.....	58

Figura 16 — Amostras cerâmicas cilíndricas (antenas dielétricas) após o processo de sinterização.....	59
Figura 17 — Geometria típica de antena ressoadora dielétrica cilíndrica montada sobre plano condutor (ground plane).....	60
Figura 18 — Analisador de redes vetorial Agilent PNA N5230A com montagem experimental para excitação do modo TE_{011011}	61
Figura 19 — Modelo tridimensional da antena DRA cilíndrica implementado no software HFSS®.....	62
Figura 20 — Padrão de difração da amostra de LNO calcinada a 1200°C e da microficha ICSD 081616.....	63
Figura 21 — Diferença entre os valores experimental e calculado obtido a partir do refinamento de Rietveld.....	64
Figura 22 — Difrátograma comparativo dos compostos $LaNbO_4 - Bi_2O_3$	65
Figura 23 — Micrografia MEV das amostras $LaNbO_4$ puro e das amostras de $LaNbO_4$ adicionadas de Bi_2O_3 , (3000×).....	66
Figura 24 — Tamanho médio de grão em função da concentração de Bi_2O_3 , obtido a partir da análise digital das micrografias de MEV.....	70
Figura 25 — Densificação relativa (%) em função da concentração de Bi_2O_3	71
Figura 26 — Curvas de coeficiente de reflexão (S11) simuladas e experimentais, para as amostras cerâmicas e as adicionadas com Bi_2O_3	74
Figura 27 — Curvas de impedâncias real (Z') e imaginária (Z'') simuladas e experimentais, para as amostras cerâmicas LNO, e as adicionadas com Bi_2O_3	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	— Propriedades dielétricas típicas de materiais cerâmicos utilizados em aplicações de micro-ondas.....	30
Tabela 2	— Aplicações recentes de cerâmicas em antenas e sensores de alta frequência.....	49
Tabela 3	— Proporções estequiométricas e massas utilizadas de reagentes para a síntese do composto LaNbO_4 por reação em estado sólido.....	52
Tabela 4	— Relação entre a massa dos reagentes LaNbO_4 e Bi_2O_3 utilizada na formulação das amostras com adição, com respectivas nomenclaturas atribuídas.....	55
Tabela 5	— Parâmetros de refinamento de Rietveld obtidos para a amostra de LNO sintetizado.....	64
Tabela 6	— Valores de altura, diâmetro, massa, volume, densidade experimental, densidade teórica e densificação relativa das amostras de LaNbO_4 puro e adicionadas com Bi_2O_3	71
Tabela 7	— Propriedades físicas e dielétricas das amostras de LaNbO_4 puras e adicionadas com diferentes concentrações de Bi_2O_3	72
Tabela 8	— Resultados experimentais e simulados de frequência de ressonância (fr) e coeficiente de reflexão (S11).....	78
Tabela 9	— Parâmetros simulados de diretividade, ganho e eficiência das antenas DRA baseadas em amostras cerâmicas de LaNbO_4 adicionadas com diferentes teores de Bi_2O_3	84
Tabela 10	— Comparação das propriedades dielétricas (ϵ_r , $\text{tg } \delta$ e τ_f) das amostras de LaNbO_4 puro e adicionadas com Bi_2O_3 , obtidas neste trabalho.....	85

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DRA	Dielectric Resonator Antenna (Antena de Ressorador Dielétrico)
DRX	Difração de Raios X
HFSS	High Frequency Structure Simulator
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ICSD	Inorganic Crystal Structure Database
LNO	LaNbO ₄ (Ortoniobato de Lantânio)
LNOBx%	LaNbO ₄ adição com x% de Bi ₂ O ₃
ppm/°C	Partes por milhão por grau Celsius
GHz	Gigahertz
CST	Computer Simulation Technology
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
5G	Quinta geração de redes móveis
TE ₀₁₁	Transverse Electric Mode 011 (modo de ressonância em cavidades dielétricas)
ppm/°C	Partes por milhão por grau Celsius
TM	Transverse Magnetic Mode (modo magnético transversal)

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ_r	Permissividade dielétrica relativa	—
$\text{tg } \delta$	Tangente de perdas dielétricas	—
$Q \times f$	Produto fator de qualidade pela frequência	GHz
τ_f	Coefficiente de temperatura da frequência de ressonância	ppm/°C
F_0	Frequência de ressonância	GHz
D	Diretividade	dBi
G	Ganho	dBi
η	Eficiência de radiação	%
λ	Comprimento de onda	m
λ_0	Comprimento de onda no vácuo	m
Z	Impedância	Ω
Z'	Parte real da impedância	Ω
Z''	Parte imaginária da impedância	Ω
S_{11}	Parâmetro de espalhamento (coeficiente de reflexão)	dB
®	Marca Registrada	—

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Materiais Cerâmicos	20
1.2	Cerâmica ortoníobato de lantânio (LaNbO_4)	22
1.3	Óxido de bismuto (Bi_2O_3).....	24
1.4	Efeitos da adição no $\text{LaNbO}_4\text{-Bi}_2\text{O}_3$	25
2	OBJETIVOS.....	27
2.1	Objetivo Geral.....	27
2.2	Objetivos Específicos.....	27
3	JUSTIFICATIVA.....	28
4	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	29
4.1	Materiais Cerâmicos e Suas Propriedades Funcionais.....	29
4.2	Fundamentos das Equações Eletromagnéticas e Dielétricas	31
4.2.1	<i>Equações de Maxwell</i>	31
4.2.2	<i>Propagação de ondas em meios dielétricos</i>	32
4.2.3	<i>Permissividade relativa e capacidade de armazenamento de energia</i>	34
4.3	Técnicas de Caracterização Físico-Estrutural de Cerâmicas	34
4.3.1	<i>Difração de Raios X (DRX)</i>	34
4.3.2	<i>Refinamento Rietveld</i>	35
4.3.3	<i>Importância da Correlação Estrutura-Propriedade</i>	36
4.3.4	<i>Densificação em Materiais Cerâmicos</i>	37
4.4	Técnicas de Caracterização Dielétrica	38
4.4.1	<i>Método de Hakki-Coleman</i>	39
4.4.2	<i>Coeficiente de temperatura da frequência de ressonância (τ_f)</i>	40
4.4.3	<i>Correlação entre Estrutura e Propriedades Dielétricas</i>	40
4.5	Cerâmicas para Aplicações em Micro-ondas e Antenas DRA	42
4.6	Parâmetros de Desempenho em Antenas Ressonadoras Dielétricas (DRAs)	43
4.6.1	<i>Diretividade (D)</i>	43
4.6.2	<i>Ganho (G)</i>	44

4.6.3	<i>Eficiência de radiação (η)</i>	44
4.6.4	<i>Frequência de ressonância (f_0)</i>	45
4.6.5	<i>Largura de banda (BW)</i>	47
4.7	Aplicações Recentes e Perspectivas em Antenas e Cerâmicas Dielétricas.....	48
5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	51
5.1	Preparação da matriz cerâmica LaNbO_4 (LNO)	51
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
6.1	Difração de raios-X.....	63
6.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	66
6.3	Densificação Relativa das Amostras.....	70
6.4	Estudos das propriedades elétricas na região de micro-ondas.....	72
6.5	Simulação Numérica.....	73
6.6	Síntese comparativa com a literatura	85
7	CONCLUSÃO	87
8	TRABALHOS FUTUROS.....	88
9	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por sistemas de comunicação sem fio de alta frequência tem impulsionado o desenvolvimento de dispositivos compactos, eficientes e com baixo custo de fabricação. Neste cenário, antenas ressoadoras dielétricas (Dielectric Resonator Antennas – DRAs) vêm se destacando como alternativa promissora às antenas convencionais, em especial em aplicações de micro-ondas, como tecnologias 5G, radares, sensores e dispositivos integrados em Internet das Coisas (IoT) (BESSA et al., 2020; NOGUEIRA et al., 2023; ZHU et al., 2020).

O desempenho de uma DRA está diretamente relacionado às características do material cerâmico empregado, que deve conciliar estabilidade térmica, baixas perdas e boa resposta dielétrica. Entre os diversos candidatos, o ortoníobato de lantânio (LaNbO_4) tem recebido atenção significativa por apresentar estrutura cristalina monoclinica estável e propriedades compatíveis com dispositivos de micro-ondas (DENG, J. Y. *et al.*, 2021; GUO, D. *et al.*, 2017).

Apesar desse potencial, um entrave relevante na utilização do LaNbO_4 é sua elevada temperatura de sinterização, que normalmente ultrapassa os 1300 °C, aumentando os custos de processamento e reduzir a viabilidade comercial do material (ZHU, H. *et al.*, 2020). Para contornar essa limitação, diferentes abordagens vêm sendo exploradas, como o uso de aditivos com baixo ponto de fusão, capazes de atuar como agentes de sinterização por fase líquida (MANE *et al.*, 2024). Entre eles, o Bi_2O_3 tem se mostrado eficaz por reduzir a temperatura de sinterização, favorecer a densificação, tornando-se uma adição promissora ao LaNbO_4 em aplicações de micro-ondas (DUAN, X. *et al.*, 2024; SWAMI *et al.*, 2025).

Ainda que haja trabalhos sobre Bi_2O_3 em sistemas semelhantes, estudos sistemáticos voltados especificamente para o LaNbO_4 em antenas ressoadoras dielétricas permanecem escassos. Esta pesquisa busca contribuir para esse campo ao estudar a influência do Bi_2O_3 nas propriedades estruturais, microestruturais, e funcionais do LaNbO_4 com vistas à sua aplicação como elemento ativo em DRAs.

1.1 Materiais Cerâmicos

A palavra “cerâmica” deriva do grego *keramikós*, que significa “substância queimada”. A utilização desses materiais remonta ao período neolítico (~25.000 a.C.), com a confecção de utensílios moldados em argila e posteriormente submetidos ao calor (BARSOUM, 2003). Do ponto de vista científico, materiais cerâmicos são definidos como sólidos inorgânicos,

geralmente cristalinos, formados por elementos metálicos e não metálicos unidos predominantemente por ligações iônicas ou covalentes (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Os materiais cerâmicos destacam-se por sua elevada dureza, resistência à compressão, à corrosão química e aos choques térmicos, além de apresentarem baixa condutividade elétrica e térmica — embora existam composições que os tornam semicondutores, condutores e até supercondutores (SEBASTIAN, Mailadil T., 2008; SWAMI *et al.*, 2025). Essas propriedades os tornam atraentes para aplicações em dispositivos eletrônicos, ópticos, biomateriais, sensores e antenas (NOGUEIRA, Francisco Enilton, Alves *et al.*, 2023).

A combinação entre estrutura cristalina estável, elevada estabilidade térmica e resposta dielétrica faz das cerâmicas um grupo de materiais amplamente pesquisado em aplicações modernas, como telecomunicações, sensores e dispositivos para micro-ondas (BARSOUM, 2003; CARMO, Felipe F. DO *et al.*, 2025; KANG, 2005).

Os materiais cerâmicos podem ser classificados conforme diferentes critérios:

- Por composição química: óxidos (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2), carbonetos (SiC), nitretos (Si_3N_4), oxinitretos, entre outros;
- Por origem mineralógica: como quartzo, bauxita, mulita, apatita e zircônia;
- Por método de conformação: prensagem isostática, colagem por barbotina, moldagem por injeção, extrusão etc.

Além disso, podem ser agrupados por funcionalidade:

- Cerâmicas tradicionais: fabricadas a partir de argilas e minerais naturais (ex: tijolos, telhas, louças);
- Cerâmicas avançadas: materiais com alta pureza e controle microestrutural, usados em áreas de alta tecnologia como telecomunicações e sensores;
- Vidros e vitrocerâmicas: possuem estrutura amorfa ou parcialmente cristalina;
- Cerâmicas abrasivas: como Al_2O_3 e SiC, empregadas em polimento, jateamento e corte;
- Cimentos cerâmicos: como fosfato de cálcio, amplamente utilizados em aplicações estruturais e médicas (KANG, 2005; RAHAMAN, 2017).

As cerâmicas avançadas vêm ganhando espaço devido à sua capacidade de atender a requisitos específicos de propriedades ópticas, dielétricas, piezoelétricas e eletromagnéticas (Sebastian, 2008). Adições controladas e técnicas de sinterização refinadas permitem ajustar essas propriedades conforme a aplicação desejada (SWAMI *et al.*, 2025). O desempenho de materiais cerâmicos em aplicações eletromagnéticas, como antenas ressoadoras dielétricas

(DRAs), depende de um conjunto de propriedades dielétricas, térmicas e estruturais, entre as quais se destacam (BARSOUM, 2003; CALLISTER; RETHWISCH, 2016; SEBASTIAN, M.T.; SILVA, M.A.S.; SOMBRA, A.S.B., 2017):

- Permissividade dielétrica relativa (ϵ_r): capacidade do material de armazenar energia elétrica. É definida por $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$, onde $\epsilon_0 \approx 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ é a permissividade do vácuo. Materiais com ϵ_r elevada permitem a miniaturização de dispositivos.
- Tangente de perda dielétrica ($\text{tg } \delta$): representa a fração de energia elétrica dissipada na forma de calor. Para aplicações em micro-ondas, são desejáveis valores inferiores a 10^{-3} .
- Fator de qualidade (Q) e $Q \times f$: o fator Q é o inverso da tangente de perdas, e o produto $Q \times f$ expressa o desempenho do material na frequência de operação. Para telecomunicações, espera-se que $Q \times f > 50.000 \text{ GHz}$.
- Coeficiente de temperatura da frequência ressonante (τ_f): indica a estabilidade térmica da frequência do dispositivo. Valores aceitáveis estão entre -10 e $+10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Muitos materiais cerâmicos precisam ser modificados para atender a esse intervalo.

Essas propriedades podem ser ajustadas por adições com elementos como Bi^{3+} , que atuam na estrutura cristalina, na densificação e na polarizabilidade do material (DUAN, X. *et al.*, 2024). O uso de aditivos como o Bi_2O_3 , por exemplo, tem demonstrado melhorar a densificação por sinterização assistida por fase líquida e reduzir a temperatura de sinterização — aspectos explorados nesta dissertação.

1.2 Cerâmica ortoniofato de lantânio (LaNbO_4)

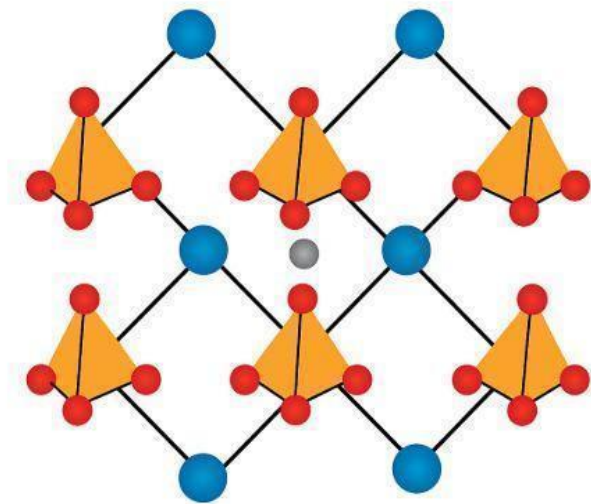
O ortoniofato de lantânio (LaNbO_4 , ou LNO) é uma cerâmica funcional pertencente à classe dos niobatos ternários de terras raras, amplamente investigada por suas propriedades dielétricas, ópticas e estruturais. Em temperatura ambiente, o LaNbO_4 cristaliza na estrutura monoclinica (grupo espacial I2/a), composta por íons La^{3+} e tetraedros NbO_4 . Quando aquecido acima de aproximadamente 540°C , ocorre uma transição de fase reversível para a estrutura tetragonal tipo scheelita (grupo I41/a) (NASCIMENTO *et al.*, 2019; XIAO *et al.*, 2020).

Essa transição envolve uma reorganização na conectividade da rede e influencia diretamente as propriedades elétricas e ópticas da cerâmica.

A Figura 1, apresenta a estrutura cristalina do LaNbO_4 monoclinico, destacando a rede tridimensional formada por íons La^{3+} (esferas azuis), grupos NbO_4^- (tetraedros laranja) e átomos

de oxigênio (esferas vermelhas e cinza). Essa configuração contribui para a polarização eletrônica local, afetando o comportamento dielétrico do material.

Figura 1— Representação esquemática da estrutura cristalina do LaNbO_4



Fonte: Elaborado pelo autor com base em MATHER; FISHER; ISLAM (2010).

Do ponto de vista estrutural, a fase tetragonal apresenta maior simetria e caminhos de difusão iônica mais isotrópicos, enquanto a fase monoclínica restringe a mobilidade iônica, afetando a resposta dielétrica em função da temperatura (HAN *et al.*, 2024).

Estudos de refinamento de Rietveld e difração de elétrons indicam que modulações na rede cristalina podem modificar o volume da célula unitária e a condutividade total (DUAN, X. *et al.*, 2024).

O LaNbO_4 apresenta permissividade dielétrica relativa ($\epsilon_r \approx 19\text{-}20$), baixa tangente de perdas dielétricas ($\text{tg } \delta \approx 2,7 \times 10^{-4}$), coeficiente térmico da frequência ($\tau_f \approx +7$ a $+9$ ppm/°C) e fator $Q \times f$ superior a 50.000 GHz, quando sinterizado a 1250 - 1275 °C (NASCIMENTO, 2019; SEBASTIAN e JANTUNEDI, 2008; XIAO *et al.*, 2020). Esses parâmetros conferem ao material elevado potencial para aplicações em micro-ondas, incluindo antenas ressoadoras dielétricas (DRAs), filtros e sensores, que demandam estabilidade térmica e baixas perdas.

Apesar dessas vantagens, a elevada temperatura de sinterização do LaNbO_4 (>1300 °C em formulações puras), representa um entrave tecnológico, elevando os custos de processamento e limitando a sua aplicação em dispositivos comerciais (NOBREGA *et al.*, 2022; SEBASTIAN, 2008).

Para contornar essa limitação, propõe-se investigar a adição do óxido de bismuto (Bi_2O_3), que atua como agente de sinterização por fase líquida, promovendo maior densificação e melhoria das propriedades dielétricas (DUAN et al., 2024; SWAMI et al., 2025).

Sua alta polarizabilidade favorece o aumento da permissividade dielétrica e a redução de perdas, justificando o interesse em sistemas $\text{LaNbO}_4\text{--Bi}_2\text{O}_3$ para aplicações de micro-ondas.

Além disso, o LaNbO_4 tem se mostrado eficiente como hospedeiro para dopagem com íons terras raras (Er^{3+} , Yb^{3+} , Pr^{3+} e Tm^{3+}), ativando mecanismos de luminescência por *upconversion* e possibilitando aplicações em sensores ópticos, emissores e dispositivos fotônicos (CARMO et al., 2025; PAVANI et al., 2021).

Também se tem explorado a dopagem com óxidos de transição (NiO e CoO), que pode modificar as propriedades estruturais e elétricas, favorecendo o crescimento de grãos e a densificação (DENG, J. Y. et al., 2021).

Ainda que os parâmetros dielétricos do LaNbO_4 atenderem aos requisitos técnicos para antenas DRA, o número de estudos experimentais dedicados à sua utilização direta em dispositivos reais de micro-ondas, ainda é reduzido. Assim, esta pesquisa propõe uma análise experimental e teórica dos efeitos da adição de Bi_2O_3 ao LaNbO_4 , com o objetivo de otimizar suas propriedades dielétricas e viabilizar sua aplicação como elemento ativo em antenas DRA de alta eficiência.

1.3 Óxido de bismuto (Bi_2O_3)

O óxido de bismuto (Bi_2O_3) é um composto inorgânico de ampla aplicação na ciência dos materiais, notadamente em sistemas dielétricos, sensores, dispositivos ópticos e como aditivo sinterizante em matrizes cerâmicas. Apresenta uma combinação de características físico-químicas relevantes, como alto índice de refração, ampla banda de absorção óptica, elevada polarizabilidade eletrônica e baixa toxicidade (MANE et al., 2024).

O Bi_2O_3 cristaliza em diversas formas polimórficas, sendo as principais: $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ (monoclínica, estável em temperatura ambiente), $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ (tetragonal, entre 650–730 °C), $\gamma\text{-Bi}_2\text{O}_3$ (cúbica de corpo centrado, metaestável), e $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ (cúbica de face centrada, estável acima de 730 °C). A fase δ apresenta condutividade iônica excepcionalmente alta, sendo estudada para aplicações em eletrólitos sólidos e sensores (DUAN, X. et al., 2024).

Uma de suas aplicações mais relevantes em cerâmicas é como agente de sinterização por fase líquida. Devido ao seu baixo ponto de fusão (~825 °C), o Bi_2O_3 forma uma fase líquida durante o aquecimento, facilitando a mobilidade de íons e a densificação do material cerâmico.

Essa propriedade tem sido explorada com sucesso para reduzir a temperatura de sinterização de diversas matrizes, como LaNbO_4 , $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, e CaMoO_4 (SWAMI et al., 2025; ARAÚJO et al., 2022).

Além de sua atuação estrutural, o Bi_2O_3 pode contribuir funcionalmente para as propriedades elétricas e ópticas do material final. Estudos indicam que o Bi^{3+} pode substituir parcialmente o La^{3+} em algumas estruturas cristalinas, modificando a polarização local, criando vacâncias de oxigênio e, em alguns casos, aumentando a permissividade dielétrica e reduzindo as perdas dielétricas (DUAN, X. et al., 2024; SWAMI et al., 2025).

A adição de Bi_2O_3 tem sido aplicada com sucesso em diferentes sistemas, incluindo perovskitas, niobatos e molibdatos, com efeitos positivos sobre propriedades dielétricas, comportamento térmico e crescimento de grão (MANE et al., 2024). Entretanto, é necessário um controle rigoroso da quantidade de Bi_2O_3 adicionada, o que envolve a definição precisa da proporção estequiométrica, a homogeneização adequada da mistura e a otimização dos parâmetros de sinterização (tempo, temperatura e atmosfera), uma vez que concentrações elevadas ou processamento inadequado podem levar à formação de fases secundárias indesejadas ou à volatilização de Bi durante a sinterização (Xiao et al., 2020).

Neste trabalho, o Bi_2O_3 é utilizado com o objetivo de reduzir a temperatura de sinterização da matriz LaNbO_4 e, simultaneamente, melhorar sua densificação e resposta dielétrica. A atuação conjunta estrutural e funcional do Bi_2O_3 torna-o um aditivo estratégico no desenvolvimento de cerâmicas avançadas para aplicações em antenas ressoadoras dielétricas.

Com base na relevância das propriedades dos materiais cerâmicos para aplicações em micro-ondas, nas características da matriz LaNbO_4 e nos potenciais efeitos estruturais e dielétricos da adição de Bi_2O_3 , este trabalho propõe uma investigação sistemática e aplicada desses materiais. Nos capítulos seguintes, são apresentados os objetivos da pesquisa, a justificativa científica, a fundamentação teórica e os procedimentos experimentais adotados para a síntese, caracterização e análise das amostras desenvolvidas.

1.4 Efeitos da adição no $\text{LaNbO}_4\text{-Bi}_2\text{O}_3$

A adição é uma estratégia amplamente utilizada para ajustar as propriedades estruturais e dielétricas de cerâmicas avançadas. No caso do LaNbO_4 , o Bi_2O_3 tem se destacado por sua eficiência em promover densificação por fase líquida e reduzir perdas dielétricas, resultando em melhorias nos parâmetros funcionais (NOGUEIRA, 2024; DUAN et al., 2024). Estudos recentes mostram que pequenas adições (1–3% molar) elevam a permissividade relativa (ϵ_r)

para valores acima de 21 e aumentam o $Q \times f$ para mais de 60.000 GHz, efeitos associados à eliminação de poros e à melhor compactação dos grãos (NOGUEIRA, 2024). Além disso, o coeficiente térmico da frequência de ressonância (τ_f) tende a se aproximar de zero, favorecendo a estabilidade em micro-ondas.

Assim, a escolha da adição deve considerar não apenas o raio iônico e a valência, mas também a função desejada — seja como sinterizante, modificador estrutural ou indutor de propriedades específicas. No caso do Bi_2O_3 , sua ação simultânea sobre a microestrutura e as propriedades funcionais explica por que deve ser investigado como adição ao LaNbO_4 em aplicações de micro-ondas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar os efeitos da adição de óxido de bismuto (Bi_2O_3) na matriz cerâmica de ortoniofato de lantânio (LaNbO_4) nas propriedades dielétricas e avaliar a aplicabilidade desses materiais como antena ressoadora dielétrica operando na faixa de micro-ondas.

2.2 Objetivos Específicos

- Sintetizar matriz cerâmicas LaNbO_4 por meio do método da reação em estado sólido e então obter compósitos cerâmicos $\text{LaNbO}_4 - \text{Bi}_2\text{O}_3$;
- Caracterizar estruturalmente as amostras obtidas por difração de raios X (DRX) e realizar o refinamento Rietveld para a amostra de LaNbO_4 puro;
- Estudar as propriedades dielétricas na faixa de micro-ondas, tais como permissividade relativa (ϵ'_r), tangente de perda ($\text{tg } \delta$), ($Q \times f$);
- Avaliar os materiais como antenas ressoadoras dielétricas utilizando o software HFSS (High Frequency Structure Simulator).

3 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por dispositivos de comunicação operando na faixa de micro-ondas tem impulsionado o desenvolvimento de materiais cerâmicos avançados com propriedades dielétricas otimizadas. Nesse contexto, antenas ressoadoras dielétricas (Dielectric Resonator Antennas – DRAs) se destacam por apresentarem elevado fator de qualidade, baixas perdas, miniaturização e boa adaptação de impedância (NOGUEIRA, Francisco Enilton Alves *et al.*, 2024).

Entre os materiais candidatos ao uso em DRAs, o ortoniofato de lantânio (LaNbO_4) é amplamente estudado devido à sua estrutura cristalina monoclinica estável e propriedades elétricas adequadas, como permissividade relativa moderada e coeficiente térmico da frequência ressonante dentro da faixa -10 a $+10$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ (DENG, J. Y. *et al.*, 2021). Entretanto, um dos principais desafios no uso da cerâmica LaNbO_4 em aplicações tecnológicas é sua elevada temperatura de sinterização, tipicamente superior a 1300°C , o que aumenta o custo energético do processo e limita sua viabilidade em aplicações práticas (Xiao *et al.*, 2018).

A adição de Bi_2O_3 surge como estratégia eficiente para viabilizar a sinterização em temperaturas mais baixas, além de contribuir para propriedades dielétricas aprimoradas, fatores essenciais para antenas DRA de alto desempenho (BIRADAR *et al.*, 2024; ALVES *et al.*, 2024).

Além de atuar como agente sinterizante, o Bi_2O_3 também pode influenciar positivamente as propriedades dielétricas do material final. Estudos indicam que sua adição resulta em maior permissividade relativa e menor fator de perdas, devido à redução da porosidade, à formação de ligações mais polarizáveis e à possível substituição parcial de íons Bi^{3+} nos sítios de La^{3+} (DUAN, X. *et al.*, 2024; SWAMI *et al.*, 2025). Esses efeitos contribuem diretamente para o desempenho das antenas DRA, ampliando sua eficiência de radiação e largura de banda.

Esta pesquisa se justifica pela necessidade de otimizar a sinterização e as propriedades dielétricas da matriz LaNbO_4 por meio da adição de Bi_2O_3 , visando seu uso como material funcional em antenas ressoadoras dielétricas. A originalidade deste trabalho reside na abordagem sistemática da influência do Bi_2O_3 na estrutura, microestrutura, desempenho elétrico e funcional do material, contribuindo com novos dados para o campo de cerâmicas avançadas para aplicações em micro-ondas.

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que embasam o desenvolvimento e a aplicação de materiais cerâmicos em dispositivos de micro-ondas, com foco especial nas propriedades dielétricas exigidas para o funcionamento eficiente de antenas ressoadoras dielétricas (DRAs). São abordados conceitos fundamentais relacionados à estrutura e às propriedades funcionais dos materiais cerâmicos, às equações eletromagnéticas aplicadas à propagação de ondas em meios dielétricos, às técnicas de caracterização estrutural e dielétrica, e às relações entre microestrutura, constantes dielétricas e desempenho em aplicações de telecomunicações. Esses tópicos fornecem a base conceitual necessária para a análise dos resultados apresentados posteriormente nesta dissertação.

4.1 Materiais Cerâmicos e Suas Propriedades Funcionais

Os materiais cerâmicos apresentam papel fundamental em dispositivos de micro-ondas e sistemas de telecomunicações devido às suas propriedades dielétricas estáveis, elevada resistência química e térmica, além da capacidade de manter desempenho confiável sob diferentes condições operacionais. O comportamento desses materiais é fortemente determinado por quatro parâmetros físicos principais: permissividade dielétrica relativa (ϵ_r), tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$), fator de qualidade ($Q \times f$) e coeficiente de temperatura da frequência de ressonância (τ_f) (SEBASTIAN; SILVA; SOMBRA, 2017).

A permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) quantifica a capacidade do material em armazenar energia elétrica quando submetido a um campo eletromagnético. Valores moderadamente elevados de ϵ_r favorecem a miniaturização de dispositivos, já que o comprimento de onda dentro do dielétrico é reduzido. Em geral, cerâmicas com ϵ_r entre 20 e 90 são consideradas ideais para substratos, filtros e antenas ressoadoras dielétricas (SEBASTIAN; SOMBRA, 2017).

A tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$) expressa a fração de energia dissipada sob a forma de calor durante a operação. Em aplicações de micro-ondas, são preferíveis materiais com $\tan \delta$ inferiores a 10^{-3} , garantindo maior eficiência energética e estabilidade de radiação (NASCIMENTO, 2019).

O fator de qualidade (Q), definido como o inverso da tangente de perdas ($Q = 1/\tan \delta$), está diretamente associado à pureza estrutural e à densificação da cerâmica. Em dispositivos de

telecomunicações, adota-se comumente o produto $Q \times f$, sendo desejáveis valores superiores a 50.000 GHz para garantir baixas perdas dielétricas e elevado desempenho (GUO et al., 2017).

O coeficiente de temperatura da frequência de ressonância (τ_f) mede a variação da frequência ressonante com a temperatura, devendo situar-se idealmente entre -10 e $+10$ ppm/°C para garantir estabilidade térmica (SEBASTIAN; JANTARPEDI, 2008; NASCIMENTO, 2019). Valores fora dessa faixa tendem a causar deriva térmica da frequência, comprometendo a precisão de dispositivos ressonantes.

A otimização simultânea de ϵ_r , $\text{tg } \delta$, $Q \times f$ e τ_f constitui o ponto de equilíbrio na seleção de materiais para antenas ressoadoras dielétricas, filtros e osciladores de micro-ondas. Além dessas propriedades elétricas, fatores como processabilidade, custo, estabilidade química e compatibilidade térmica com outras camadas cerâmicas também influenciam a escolha do material base.

Tabela 1 — Propriedades dielétricas típicas de materiais cerâmicos utilizados em aplicações de micro-ondas.

Material	ϵ_r (relativa)	$\text{tg } \delta$ ($\times 10^{-4}$)	$Q \times f$ (GHz)	τ_f (ppm/°C)	Referência
LaNbO ₄ (puro)	19–20	2-3	~50.000	+7 a +9	Sebastian (2008); Xiao et al. (2018)
CaMoO ₄ (puro)	9,3	5,2	21.605	-30	Nogueira et al. (2024)
BaTiO ₃ (puro)	~1200	~200	~1.000	+800	Sebastian (2008)
YNbO ₄ (puro)	15,5	7,1	>50.000	- 54	Do Carmo et al. (2021)

Fonte: Adaptado de Sebastian (2008); Xiao et al. (2018); Nogueira et al. (2024); Duan et al. (2024).

A Tabela 1 apresenta valores típicos das propriedades dielétricas de cerâmicas em suas fases puras, amplamente estudadas para aplicações na faixa de micro-ondas. Observa-se que o LaNbO₄ combina permissividade moderada, baixas perdas dielétricas e coeficiente térmico positivo próximo da neutralidade, características que o tornam adequado como matriz base para o desenvolvimento de novos materiais. O BaTiO₃ apresenta uma permissividade muito elevada ($\epsilon'_r \approx 1200$), porém associada a elevadas perdas dielétricas e forte dependência térmica, o que

inviabiliza seu uso direto como material ressonador. O CaMoO_4 exibe boas propriedades dielétricas e um fator de qualidade elevado ($Q \times f \approx 21\,600\text{ GHz}$), mas apresenta coeficiente térmico negativo ($\tau_f \approx -30\text{ ppm/}^\circ\text{C}$), o que limita sua estabilidade térmica. Já o YNbO_4 destaca-se pelas baixas perdas dielétricas e elevado fator de qualidade, sendo amplamente considerado uma cerâmica de referência para aplicações em micro-ondas (do Carmo et al. (2021); NOGUEIRA et al., 2024; SEBASTIAN, 2008).

4.2 Fundamentos das Equações Eletromagnéticas e Dielétricas

O entendimento do comportamento das ondas eletromagnéticas em materiais dielétricos está fundamentado nas equações de Maxwell, que descrevem as leis básicas da eletricidade e do magnetismo em meios contínuos. Tais equações são essenciais para a análise da propagação, ressonância e interação do campo eletromagnético com os materiais cerâmicos utilizados em antenas e dispositivos de micro-ondas. Neste contexto, a relação entre a permissividade relativa ϵ_r , a velocidade de fase e o comprimento de onda, bem como a influência de propriedades como o coeficiente de temperatura da frequência de ressonância (τ_f), será explorada a partir dos fundamentos teóricos clássicos do eletromagnetismo.

4.2.1 Equações de Maxwell

A análise do comportamento dielétrico de materiais cerâmicos aplicados em dispositivos de micro-ondas exige a compreensão das equações de Maxwell, que descrevem a relação entre campos elétricos, magnéticos e suas fontes — cargas e correntes. Essas equações são a base do eletromagnetismo clássico e regem a propagação de ondas eletromagnéticas em meios materiais (BARSOUM, 2003; CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

As equações de Maxwell no domínio diferencial, são expressas conforme as Equações (1), (2), (3), (4):

$$\text{(Lei de Gauss)} \quad \nabla \cdot D = \rho \quad (1)$$

$$\text{(Lei de Gauss para o magnetismo)} \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

(Lei de Faraday)

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

(Lei de Ampère-Maxwell)

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4)$$

Onde:

- $D = \epsilon E$ é o deslocamento elétrico,
- $B = \mu H$ é a densidade de fluxo magnético,
- ϵ é a permissividade elétrica,
- μ é a permeabilidade magnética,
- E é o campo elétrico,
- H é o campo magnético,
- ρ é a densidade de carga elétrica,
- J é a densidade de corrente.

Em materiais dielétricos como cerâmicas, assume-se geralmente $J = 0$ e $\rho = 0$, o que simplifica as equações para o regime linear e isotrópico, aplicável à maioria das análises de propagação em micro-ondas (BARSOUM, 2003; SEBASTIAN, M. T.; SILVA, M. A. S.; SOMBRA, 2017).

4.2.2 Propagação de ondas em meios dielétricos

A propagação de ondas eletromagnéticas em cerâmicas dielétricas ocorre com uma velocidade menor que no vácuo, dependendo da permissividade relativa (ϵ_r). Essa relação é expressa pela Equação (5):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

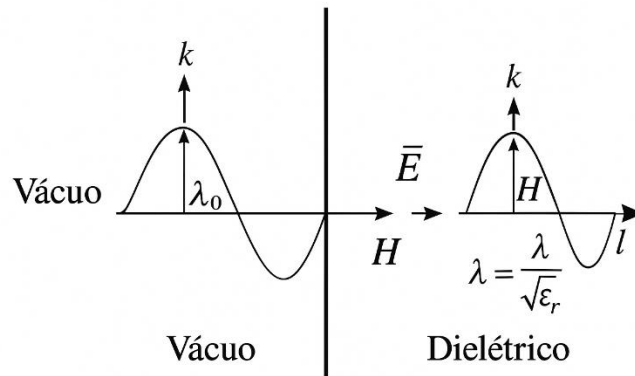
Onde c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), e ϵ_r é a permissividade relativa do material. Consequentemente, o comprimento de onda (λ) em um dielétrico pode ser determinado pela Equação (6):

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

Com $\lambda_0 = c/f$ sendo o comprimento de onda no vácuo para uma frequência f . Essa relação mostra que quanto maior o valor da permissividade relativa ϵ'_r , menor o comprimento de onda e, conseqüentemente, menor o tamanho físico necessário para atingir a condição de ressonância. Esse comportamento favorece a miniaturização de dispositivos dielétricos, como antenas ressoadoras, amplamente utilizadas em aplicações de micro-ondas (SEBASTIAN, 2008).

A Figura 2 ilustra a propagação de uma onda eletromagnética ao atravessar a interface entre o vácuo e um dielétrico. Observa-se a redução do comprimento de onda, de λ_0 (no vácuo) para λ (no dielétrico), conforme a relação expressa na Equação (6), na qual ϵ_r representa a permissividade relativa do meio. O esquema também evidencia a orientação ortogonal dos vetores de campo elétrico ($\vec{E}$), campo magnético ($\vec{H}$) e vetor de propagação ($\vec{k}$), característica das ondas eletromagnéticas transversais descritas pelas equações de Maxwell. Essa representação reforça que, ao penetrar em um dielétrico, a onda sofre redução simultânea da velocidade e do comprimento de onda, fenômeno fundamental para o entendimento da propagação de sinais em cerâmicas aplicadas em dispositivos de micro-ondas (NOGUEIRA et al., 2023; SEBASTIAN, 2008).

Figura 2 — Propagação de uma onda eletromagnética ao atravessar a interface entre vácuo e dielétrico.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em fundamentos da teoria eletromagnética clássica (MAXWELL, 1873).

4.2.3 Permissividade relativa e capacidade de armazenamento de energia

A permissividade relativa também está relacionada à capacidade de armazenamento de energia elétrica. A capacitância de um dispositivo com placas planas paralelas pode ser expressa pela Equação (7):

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (7)$$

Onde A é a área das placas, d é a distância entre elas, e ε_0 é a permissividade do vácuo. Materiais com maior ε_r permitem maior densidade de energia armazenada, sendo, portanto, ideais para aplicações como filtros, guias de onda e ressoadores em radiofrequência (RF) (BARSOUM, 2003; RAHAMAN, 2017). Esse conceito é fundamental para o uso de cerâmicas como substratos ou elementos ressoadores em dispositivos de micro-ondas.

4.3 Técnicas de Caracterização Físico-Estrutural de Cerâmicas

A caracterização estrutural de materiais cerâmicos é fundamental para compreender a correlação entre sua estrutura cristalina, microestrutura e propriedades funcionais, especialmente em aplicações que envolvem dispositivos de micro-ondas. Entre as técnicas mais empregadas destacam-se a Difração de Raios X (DRX), com o Refinamento Rietveld, (NASCIMENTO, 2019; ALVES et al., 2024).

4.3.1 Difração de Raios X (DRX)

A Difração de Raios X é a técnica padrão para identificação de fases cristalinas, análise da estrutura cristalina, determinação dos parâmetros de rede e avaliação do grau de cristalinidade em materiais cerâmicos (CULLITY; STOCK, 2001).

Quando um feixe de raios X incide sobre um cristal, ocorre a difração dos feixes conforme a Lei de Bragg, expressa pela Equação (8):

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (8)$$

Onde:

- n é o número da ordem de difração,
- λ é o comprimento de onda da radiação incidente,
- d é a distância interplanar,
- θ é o ângulo de difração.

Por meio da análise do padrão de difração, é possível identificar fases presentes no material, determinar a estrutura cristalina (ex.: monoclinica ou tetragonal para LaNbO_4) e estimar o tamanho médio de cristalitos via a equação de Scherrer:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (9)$$

Onde:

- D é o tamanho médio do cristalito,
- K é a constante de forma ($\sim 0,9$),
- β é a largura à meia altura (*Full Width at Half Maximum*, FWHM) do pico de difração,
- θ é o ângulo de Bragg (Cullity e Stock, 2001).

A técnica de DRX também permite identificar o surgimento de fases secundárias, desejáveis ou não, que podem se formar durante o processo de sinterização, como no caso da adição de Bi_2O_3 (ARAÚJO, DE *et al.*, 2022; SWAMI *et al.*, 2025).

4.3.2 Refinamento Rietveld

O método de refinamento de Rietveld é uma ferramenta avançada utilizada para ajustar quantitativamente o padrão de difração experimental com base em um modelo estrutural teórico, permitindo extrair com maior precisão parâmetros cristalográficos como:

- Parâmetros de rede (a , b , c , α , β , γ);
- Fração de fases;
- Fatores de ocupação;

- Parâmetros térmicos.

Esse método utiliza o ajuste das intensidades calculadas aos dados experimentais minimizando a função de erro, geralmente pelo método dos mínimos quadrados (YOUNG, 1993).

Nas investigações com ortoníobato de lantânio (LaNbO_4), o refinamento Rietveld é especialmente útil para identificar pequenas distorções estruturais que podem ocorrer com a adição com Bi_2O_3 , como alterações nos parâmetros de rede e volumes de célula unitária (NASCIMENTO, 2019; ALVES, 2024). Tais modificações estruturais impactam diretamente nas propriedades dielétricas do material.

Esse método é essencial para a obtenção de parâmetros cristalográficos precisos, permitindo a avaliação da estrutura, identificação de fases e a correlação direta com as propriedades elétricas e funcionais do material, especialmente quando modificações estruturais são promovidas por processos como a adição com Bi_2O_3 (SWAMI *et al.*, 2025).

Em sistemas como LaNbO_4 adicionado com Bi_2O_3 , o refinamento permite verificar se há substituição iônica do La^{3+} por Bi^{3+} , bem como a formação de fases secundárias, como óxidos de bismuto ou niobatos ricos em bismuto (ALVES *et al.*, 2024).

4.3.3 Importância da Correlação Estrutura-Propriedade

A correta caracterização estrutural é essencial para a correlação com as propriedades dielétricas desejadas, como a permissividade relativa (ϵ'_r), a estabilidade térmica (τ_f) e o fator de qualidade ($Q \times f$). Pequenas variações na estrutura cristalina podem ocasionar alterações significativas nas propriedades funcionais, especialmente em sistemas sensíveis, como as antenas DRA (NASCIMENTO, 2019; NOGUEIRA, 2024).

O refinamento permite reduzir as incertezas na estimativa dos parâmetros de rede, além de fornecer o volume da célula unitária com maior precisão. O valor do R-fator indica a qualidade do ajuste entre o modelo teórico e os dados experimentais, sendo utilizado como critério de validação do modelo cristalográfico.

A combinação dos resultados obtidos por meio do refinamento Rietveld e da análise microestrutural permite estabelecer uma correlação direta entre a estrutura cristalina refinada, a distribuição de grãos e poros, e as propriedades dielétricas observadas nos materiais cerâmicos. Variações nos parâmetros de rede, presença de tensões internas ou mesmo a formação de fases secundárias podem impactar significativamente a permissividade dielétrica,

a tangente de perda e a estabilidade térmica da frequência de ressonância. Essa abordagem integrada é essencial para interpretar, com maior profundidade, os resultados obtidos nas caracterizações elétricas e de micro-ondas apresentadas nos tópicos seguintes desta dissertação.

4.3.4 *Densificação em Materiais Cerâmicos*

A densificação é um dos principais processos envolvidos na sinterização de materiais cerâmicos, estando diretamente relacionada à eliminação da porosidade e ao aumento da fração volumétrica sólida da peça. Esse fenômeno resulta em maior compactação da microestrutura e, conseqüentemente, em melhores propriedades funcionais, como resistência mecânica, estabilidade térmica e desempenho elétrico (KINGERY; BOWEN; UHLMANN, 1976).

No contexto de aplicações em micro-ondas, a densificação adquire relevância especial, uma vez que a porosidade residual e heterogeneidades microestruturais atuam como centros de espalhamento e contribuem para o aumento da tangente de perdas dielétricas. Assim, o grau de densificação é um parâmetro crítico para a avaliação de cerâmicas destinadas a ressoadores dielétricos, filtros e antenas, pois influencia diretamente a permissividade relativa, o fator de qualidade e a estabilidade da frequência ressonante (SEBASTIAN; JANTARPEDI, 2008; GUO et al., 2017; DUAN et al., 2024).

A densidade experimental (ρ_{exp}) é determinada pela razão entre a massa da amostra e o seu volume geométrico, considerando o formato cilíndrico das pastilhas, conforme a Equação (10):

$$\rho_{exp} = \frac{m}{V}, \quad V = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h \quad (10)$$

em que:

- m é a massa da amostra (g);
- V é o volume (cm^3);
- d é o diâmetro (cm);
- h é a altura da amostra (cm).

Para compósitos multicomponentes, como LaNbO_4 adicionado com Bi_2O_3 , a densidade teórica ρ_{teo} não pode ser considerada igual à da matriz pura.

O valor adequado deve ser obtido pela média harmônica ponderada pelas frações em massa de cada constituinte, conforme descrito em Nogueira (2024) e expresso na Equação (11):

$$\rho_{\text{teo}} = \frac{1}{\frac{m_{\text{LNO}}}{\rho_{\text{LNO}}} + \frac{m_{\text{Bi}_2\text{O}_3}}{\rho_{\text{Bi}_2\text{O}_3}}} \quad (11)$$

em que:

- m_{LNO} e $m_{\text{Bi}_2\text{O}_3}$ são as frações em massa dos óxidos,
- ρ_{LNO} e $\rho_{\text{Bi}_2\text{O}_3}$ são suas densidades teóricas obtidas pelo ICSD, sendo 5,90 g/cm³ e 9,29 g/cm³, respectivamente.

A densificação relativa (D_{rel}) é descrita na Equação (12):

$$D_{\text{rel}}(\%) = \frac{\rho_{\text{exp}}}{\rho_{\text{teo}}} \times 100, \quad (12)$$

Valores mais altos de densificação estão geralmente associados a uma microestrutura mais homogênea, menor porosidade residual e melhor desempenho dielétrico (GUO et al., 2017).

4.4 Técnicas de Caracterização Dielétrica

A caracterização dielétrica de materiais cerâmicos é essencial para avaliar seu desempenho em dispositivos que operam na faixa de micro-ondas, tais como antenas, filtros e ressoadores. Entre os parâmetros críticos que determinam a eficiência desses dispositivos destacam-se a permissividade relativa (ϵ'_r), a tangente de perdas dielétricas ($\text{tg } \delta$) e o produto $Q \times f$, diretamente relacionados à capacidade de miniaturização, eficiência energética e estabilidade em frequência. Para a determinação precisa desses valores, diferentes metodologias vêm sendo propostas e aplicadas na literatura (SEBASTIAN; JANTUNEN, 2008; REANEY; ILLY, 2019). Neste trabalho, empregou-se o método de Hakki–Coleman (HAKKI; COLEMAN, 1960), amplamente reconhecido por sua acurácia na medição de propriedades

dielétricas em cerâmicas compactadas na forma de cilindros, permitindo a obtenção confiável de ϵ'_r , $\tan \delta$ e $Q \times f$ em condições controladas.

4.4.1 Método de Hakki-Coleman

O método de Hakki–Coleman é amplamente empregado para a caracterização dielétrica de materiais cerâmicos na faixa de micro-ondas (HAKKI; COLEMAN, 1960; SEBASTIAN; JANTUNEN, 2008). Nesse arranjo, um ressonador cerâmico cilíndrico é posicionado entre duas placas metálicas, configurando uma cavidade coaxial na qual se excita o modo $TE_{01\delta}$.

A frequência ressonante (f_0), obtida por meio de um analisador vetorial de redes (VNA) a partir dos parâmetros de espalhamento (S_{11} ou S_{21}), permite determinar a permissividade relativa (ϵ_r) do material conforme a Equação (13):

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{2hf_0} \right)^2 \quad (13)$$

em que:

- c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s);
- h é a altura do disco cerâmico (m)
- f_0 é a frequência ressonante do modo $TE_{01\delta}$.

O fator de qualidade (Q) é obtido pela razão entre a frequência central (f_0) e a largura de banda do pico de ressonância (Δf), sendo frequentemente expresso como o produto $Q \times f$, conforme a Equação (14):

$$Q \times f = \frac{f_0}{\Delta f} \cdot f_0 \quad (14)$$

Essa técnica apresenta elevada precisão na determinação de ϵ_r e $Q \times f$, sendo uma referência clássica para o estudo de cerâmicas dielétricas avançadas. Trabalhos como os de Nascimento (2019), Nogueira (2024) e Duan et al. (2024) destacam sua aplicação em materiais como $LaNbO_4$, $CaTiO_3$, $Ba(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, molibdatos e titanatos, permitindo correlacionar

composição, microestrutura e processamento com o desempenho em dispositivos de micro-ondas, tais como antenas, filtros e guias de onda.

4.4.2 Coeficiente de temperatura da frequência de ressonância (τ_f)

O coeficiente de temperatura da frequência de ressonância (τ_f) é um parâmetro essencial para avaliar a estabilidade térmica de materiais dielétricos em micro-ondas. Diferente da permissividade relativa (ϵ'_r) e do fator de qualidade ($Q \times f$), obtidos pelo método de Hakki–Coleman, o τ_f é calculado a partir da variação da frequência ressonante (f_0) em diferentes temperaturas controladas, conforme a Equação (15).

Matematicamente, o τ_f pode ser expresso como:

$$\tau_f = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta T} \text{ [ppm/}^\circ\text{C]} \quad (15)$$

em que:

- f_0 é a frequência ressonante em temperatura de referência;
- Δf é a variação da frequência em relação a f_0 ;
- ΔT é a variação de temperatura.

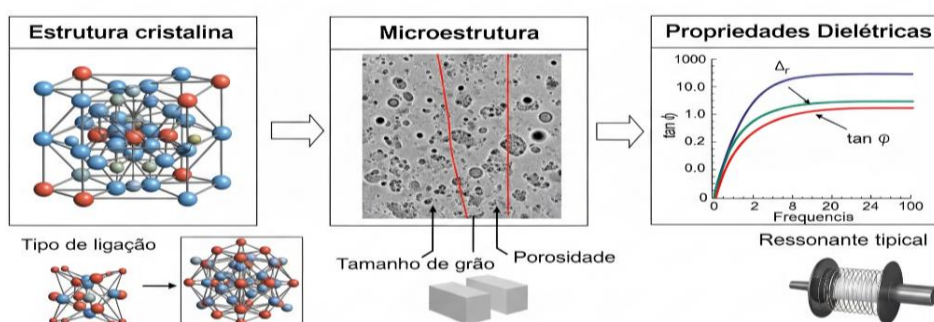
Os valores de τ_f próximos de zero (entre -10 e $+10$ ppm/ $^\circ\text{C}$) são desejáveis, pois indicam estabilidade térmica adequada do dispositivo (SEBASTIAN; JANTUNEN, 2008; REANEY; ILLY, 2019). A determinação de τ_f complementa as medições de ϵ'_r e $Q \times f$, fornecendo uma avaliação abrangente do desempenho dielétrico dos materiais em condições reais de operação (DUAN et al., 2024).

4.4.3 Correlação entre Estrutura e Propriedades Dielétricas

A correlação entre estrutura cristalina e microestrutura é determinante para as propriedades dielétricas de materiais cerâmicos em micro-ondas. Alterações na rede cristalina — como distorções locais, formação de fases secundárias ou presença de dopantes — afetam diretamente a permissividade relativa (ϵ'_r), a tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$), o produto do fator de qualidade pela frequência ($Q \times f$) e o coeficiente de temperatura da frequência de

ressonância (τ_f). O refinamento de Rietveld aplicado a dados de difração de raios X permite identificar essas variações estruturais, que se refletem na polarização local e, conseqüentemente, na resposta dielétrica. A adição de óxidos de baixo ponto de fusão, como o Bi_2O_3 , favorece a densificação e reduz a porosidade, melhorando o $Q \times f$; entretanto, concentrações excessivas podem gerar fases indesejadas e aumentar as perdas dielétricas.

Figura 3 — Relação esquemática entre estrutura cristalina, microestrutura e propriedades dielétricas em materiais cerâmicos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3 apresenta um diagrama esquemático que ilustra a correlação entre estrutura cristalina, microestrutura e propriedades dielétricas em materiais cerâmicos. À esquerda, observa-se a célula unitária representando a estrutura cristalina, destacando o papel dos tipos de ligação, distorções de rede ou presença de aditivos. No centro, o bloco da microestrutura evidencia o tamanho médio de grão e a porosidade residual, características diretamente relacionadas ao processo de sinterização. À direita, são mostrados os efeitos desses fatores sobre as propriedades funcionais, como a permissividade relativa (ϵ'_r), a tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$), o produto fator de qualidade $\times$ frequência ($Q \times f$) e o coeficiente térmico da frequência de ressonância (τ_f). O fluxo entre os blocos destaca como alterações estruturais e microestruturais se refletem no desempenho dielétrico final.

Na escala microestrutural, fatores como densificação, uniformidade de fases e distribuição da porosidade influenciam diretamente a dissipação de energia e a estabilidade térmica dos materiais. Cerâmicas densas, com grãos bem sinterizados e baixa porosidade residual, tendem a apresentar valores mais elevados de $Q \times f$ e menores perdas dielétricas, conforme relatado por Nascimento (2019) e Sebastian (2008).

Assim, o desenvolvimento de materiais cerâmicos para aplicações em ressoadores dielétricos requer a integração entre caracterização estrutural e caracterização funcional, de

modo a otimizar a composição e o processo de sinterização segundo os requisitos de desempenho em micro-ondas. Nos capítulos seguintes, os resultados obtidos com amostras de LaNbO_4 adicionadas com Bi_2O_3 serão analisados à luz dessas correlações.

4.5 Cerâmicas para Aplicações em Micro-ondas e Antenas DRA

O uso de cerâmicas dielétricas em dispositivos de micro-ondas, especialmente em antenas ressoadoras dielétricas (DRAs), vem se consolidando como uma alternativa promissora aos materiais metálicos tradicionais. As DRAs oferecem vantagens como miniaturização, baixas perdas dielétricas, alta eficiência de radiação e possibilidade de integração com substratos em dispositivos compactos de alta frequência (DUAN et al., 2024; SEBASTIAN, 2008).

Para que um material cerâmico seja adequado como elemento ativo de uma antena ressoadora dielétrica, ele deve apresentar um conjunto equilibrado de propriedades dielétricas, combinando alta permissividade relativa (ϵ'_r), baixa tangente de perdas ($\tan \delta$), elevado fator de qualidade ($Q \times f$) e coeficiente térmico da frequência (τ_f) próximo de zero. Essas características permitem reduzir o tamanho físico da antena, minimizar as perdas por dissipação de energia, garantir alta eficiência de ressonância e manter estabilidade da frequência de operação sob variações térmicas.

Entre os materiais mais estudados, destacam-se o LaNbO_4 (LNO), CaMoO_4 (CMO), YNbO_4 (YNO) e outros ortoniobatos e molibdatos, que apresentam combinação favorável de propriedades dielétricas e estabilidade estrutural. Estudos recentes apontam que a adição de óxidos como Bi_2O_3 , Pr_6O_{11} ou TiO_2 pode melhorar significativamente a densificação, reduzindo a temperatura de sinterização e otimizando ϵ'_r e $Q \times f$ (ABREU et al., 2023; ABREU et al., 2021).

Além disso, há uma correlação direta entre o valor de ϵ_r e o grau de miniaturização da antena: materiais com $\epsilon'_r > 20$ permitem obter volumes menores para uma mesma frequência de operação, sem comprometer a eficiência (ABREU et al., 2023; SEBASTIAN; SILVA; SOMBRA, 2017).

Dessa forma, a escolha do material dielétrico deve considerar não apenas os parâmetros elétricos, mas também fatores como processabilidade, estabilidade térmica e compatibilidade com a arquitetura do dispositivo, garantindo desempenho otimizado e reproduzível em aplicações de micro-ondas.

4.6 Parâmetros de Desempenho em Antenas Ressonadoras Dielétricas (DRAs)

As antenas ressoadoras dielétricas (DRAs) têm sido amplamente estudadas como alternativas promissoras para aplicações em micro-ondas e frequências milimétricas devido à sua alta eficiência, tamanho reduzido e flexibilidade de projeto. O desempenho de uma DRA depende tanto das propriedades dielétricas do material quanto da geometria do ressoador e das condições de excitação (SEBASTIAN; JANTARPEDI, 2008; ABREU, 2023).

Entre os principais parâmetros de desempenho avaliados em DRAs, destacam-se: Diretividade (D), Ganho (G), Eficiência de radiação (η), Frequência de ressonância (f_0), Largura de banda (BW).

4.6.1 Diretividade (D)

A diretividade D de uma antena é uma medida de quão eficientemente a energia irradiada é concentrada em uma direção específica, em comparação com uma fonte isotrópica que irradia uniformemente em todas as direções. Trata-se de um parâmetro fundamental para aplicações em que a concentração do feixe em uma área limitada do espaço é desejável, como em sistemas de radar, comunicação ponto-a-ponto e sensores direcionais.

Matematicamente, a diretividade é definida por:

$$D = \frac{4\pi \cdot U_{max}}{P_{rad}} \quad (16)$$

onde:

- U_{max} é a densidade de potência irradiada na direção de máxima radiação (W/sr),
- P_{rad} é a potência total irradiada pela antena (W),
- 4π corresponde à área sólida total de uma esfera (em esterradianos).

A Equação (16) mostra que quanto maior a energia concentrada em uma direção (maior U_{max}), maior será o valor de D, para uma mesma potência irradiada total.

Em antenas ressoadoras dielétricas (DRAs), a diretividade pode ser ajustada por meio da geometria do ressoador, da Permissividade Relativa do material e do modo de excitação.

Valores mais altos de ϵ_r tendem a confinar o campo mais fortemente, resultando em feixes mais estreitos e, portanto, em maior diretividade (SEBASTIAN; JANTARPEDI, 2008).

4.6.2 *Ganho (G)*

O ganho G de uma antena representa uma medida composta que leva em consideração não apenas a concentração de energia na direção desejada (diretividade), mas também a eficiência com que a antena converte a potência fornecida em radiação. Em outras palavras, o ganho incorpora os efeitos das perdas internas da antena, sejam elas dielétricas, condutivas ou por acoplamento inadequado.

A relação entre ganho, diretividade D e eficiência de radiação η é expressa pela Equação (17):

$$G = \eta \cdot D \quad (17)$$

onde:

- G é o ganho adimensional ou em dBi (decibéis em relação a uma fonte isotrópica),
- η é a eficiência de radiação ($0 < \eta \leq 1$),
- D é a diretividade da antena.

Materiais com baixa tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$) favorecem altos valores de eficiência (η) e, conseqüentemente, ganhos mais elevados. No contexto das antenas ressoadoras dielétricas (DRAs), o uso de cerâmicas com $\tan \delta < 10^{-3}$ possibilita ganhos competitivos mesmo em geometrias reduzidas (SEBASTIAN, 2008; DUAN et al., 2024). Entre os resultados obtidos neste trabalho com LaNbO_4 adicionado com Bi_2O_3 , destacam-se ganhos na faixa de 4,88 a 5,57 dBi e eficiência superior a 95%, confirmando a viabilidade do material para aplicações em micro-ondas.

4.6.3 *Eficiência de radiação (η)*

A eficiência de radiação (η) é definida como a razão entre a potência efetivamente irradiada por uma antena e a potência total fornecida a ela, conforme a Equação (18):

$$\eta = \frac{P_{irradiada}}{P_{Total}} \quad (18)$$

Essa grandeza, expressa em percentual, está diretamente associada às perdas internas do sistema, como perdas ôhmicas e dielétricas.

Em antenas ressoadoras dielétricas (DRAs), a eficiência tende a ser elevada quando o material cerâmico apresenta baixa tangente de perdas dielétricas ($\text{tg } \delta$) e microestrutura densa, livre de porosidade excessiva ou defeitos que prejudiquem a propagação das ondas eletromagnéticas.

Segundo Sebastian (2008), o uso de materiais com $\text{tg } \delta < 10^{-3}$ é recomendada em aplicações de alta frequência, garantindo eficiência superior a 90%, com estabilidade térmica e fidelidade espectral adequadas.

Além das propriedades do material, fatores geométricos – como a forma da antena, as dimensões relativas ao comprimento de onda e o método de alimentação (por exemplo, sondas coaxiais ou fendas) – também influenciam diretamente a eficiência global do sistema (DUAN et al., 2024).

4.6.4 Frequência de ressonância (f_0)

A frequência de ressonância f_0 de uma antena ressoadora dielétrica (DRA) está diretamente relacionada às propriedades eletromagnéticas do material e às dimensões físicas do ressoador.

Nos ressoadores dielétricos cilíndricos, o valor de f_0 depende do modo de excitação (TE, TM ou híbrido), da Permissividade Relativa (ϵ_r) e das dimensões geométricas da cerâmica, como raio (r) e altura (h).

Uma forma aproximada de expressar a frequência de ressonância para o modo fundamental de um ressoador dielétrico cilíndrico é dada pela Equação (19):

$$f_0 = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \cdot F(\text{modo}) \quad (19)$$

onde:

- f_0 é a frequência de ressonância (Hz);

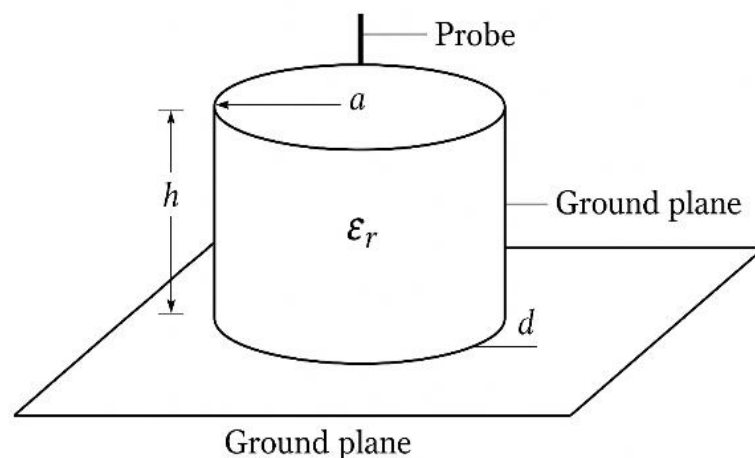
- c é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3 \times 10^8$ m/s);
- r é o raio efetivo do ressoador (m);
- ϵ_r é a Permissividade Relativa do material;
- $F_{(\text{modo})}$ é um fator adimensional que depende do tipo de excitação e da geometria do campo.

A Equação (19) demonstra que, para um determinado modo de operação, o aumento da permissividade relativa ϵ_r permite reduzir o tamanho físico da antena sem alterar a frequência de operação — propriedade amplamente explorada na miniaturização de dispositivos de micro-ondas (SEBASTIAN, 2008; NOGUEIRA, 2024).

Além disso, o controle dos modos excitados (como $TE_{01\delta}$ ou $HEM_{11\delta}$) permite ajustar o padrão de radiação conforme a aplicação desejada, otimizando diretividade, polarização e eficiência de acoplamento (ABREU, 2023).

A Figura 4 apresenta a geometria esquemática de uma antena DRA cilíndrica, onde o elemento ressoador dielétrico é excitado por meio de um probe coaxial inserido através do plano de terra metálico. Esse tipo de acoplamento é comumente utilizado para excitar modos ressonantes internos com elevada eficiência, especialmente em frequências de micro-ondas. A distribuição do campo irradiado, a largura de banda e a frequência de operação são diretamente influenciadas pela Permissividade Relativa do material, pelas dimensões físicas do ressoador e pela posição da sonda de excitação.

Figura 4 — Geometria esquemática de uma antena ressoadora dielétrica (DRA) cilíndrica montada sobre plano de terra metálico, com excitação por probe coaxial.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em SEBASTIAN; JANTARPEDI (2008) e ABREU (2023).

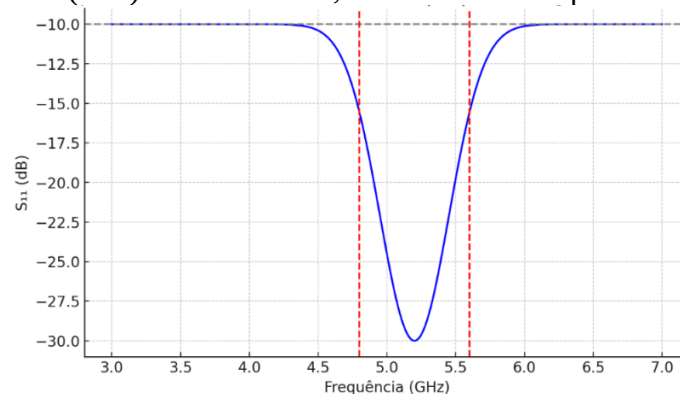
4.6.5 Largura de banda (BW)

A largura de banda (BW – *Bandwidth*) é definida como a faixa de frequências em que uma antena mantém desempenho satisfatório segundo critérios específicos, como coeficiente de reflexão, ganho e eficiência de radiação. Comumente, considera-se como largura de banda útil a faixa em que o coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$) permanece inferior a -10 dB, indicando boa adaptação da impedância entre a antena e a linha de transmissão (BALANIS, 2016; POZAR, 2012).

A largura de banda está diretamente associada ao fator de qualidade (Q) do ressonador dielétrico. Antenas baseadas em ressoadores de alto Q apresentam, geralmente, largura de banda mais estreita, enquanto ressoadores com perdas dielétricas ligeiramente maiores ou com acoplamentos otimizados podem ampliar a faixa de operação (KAO et al., 2020). Além disso, a permissividade relativa (ϵ_r) do material influencia significativamente a largura de banda: materiais com ϵ_r elevada tendem a confinar mais o campo eletromagnético, resultando em menor BW (SETOUH et al., 2014).

Como exemplo, composições cerâmicas baseadas em LaNbO_4 adicionado com óxidos modificadores, como o Bi_2O_3 , têm sido estudadas visando o ajuste das propriedades dielétricas, promovendo controle sobre o Q e a largura de banda em aplicações na faixa de micro-ondas (ZHANG et al., 2019). A introdução de aditivos pode alterar a microestrutura e aumentar a densificação cerâmica, afetando assim o desempenho da antena em termos de resposta espectral. A Figura 5 ilustra, de forma genérica, a definição de largura de banda (BW) a partir do coeficiente de reflexão $|S_{11}|$, frequentemente utilizada na caracterização de antenas ressoadoras dielétricas.

Figura 5 — Exemplo ilustrativo de coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$) indicando a largura de banda (BW) de uma antena, definida entre os pontos em que $|S_{11}| = -10$ dB.

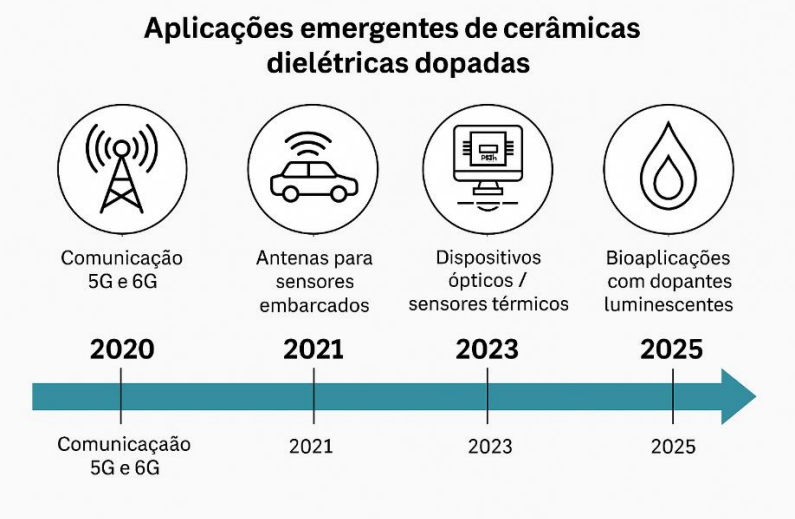


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 Aplicações Recentes e Perspectivas em Antenas e Cerâmicas Dielétricas

O avanço no desenvolvimento de materiais cerâmicos para aplicações em micro-ondas tem sido impulsionado pela crescente demanda por sistemas de comunicação de alta frequência, antenas compactas e dispositivos eficientes em diversas áreas tecnológicas. Os ressoadores dielétricos e as antenas DRA vêm ganhando destaque como elementos centrais em aplicações que exigem alta eficiência, estabilidade térmica e miniaturização, atendendo aos requisitos de tecnologias emergentes como 5G, IoT, veículos autônomos e radares compactos (DUAN et al., 2024; ZHANG et al., 2022).

Figura 6 — Aplicações emergentes de cerâmicas dielétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Duan et al. (2024), Nogueira (2024) e Fei et al. (2021).

A Figura 6 resume graficamente os principais campos de aplicação para cerâmicas dopadas utilizadas como substratos ou elementos ativos em antenas e sensores modernos. A versatilidade desses materiais permite que sejam empregados em diferentes faixas espectrais e ambientes operacionais, com requisitos variados de miniaturização, eficiência térmica e estabilidade eletromagnética.

As cerâmicas à base de ortonibatos e molibdatos, como o LaNbO_4 e o CaMoO_4 , apresentam propriedades dielétricas que atendem aos critérios exigidos para a fabricação de antenas compactas com baixo perfil e elevada estabilidade. Trabalhos recentes têm explorado estratégias de adição com óxidos como Bi_2O_3 , Pr_6O_{11} e TiO_2 , promovendo melhorias tanto na resposta dielétrica quanto no processamento cerâmico, com redução das temperaturas de sinterização e controle da microestrutura (NOGUEIRA, 2024; SWAMI et al., 2025).

Paralelamente, o desenvolvimento de ferramentas de simulação numérica, como o HFSS (High Frequency Structure Simulator) e o CST Studio Suite, tem permitido uma integração mais estreita entre a caracterização experimental e o projeto eletromagnético dos dispositivos. Tais softwares viabilizam o ajuste fino das geometrias das antenas DRA, considerando as propriedades específicas dos materiais, a geometria do ressoador, o acoplamento de excitação e o comportamento do campo irradiado (ABREU, 2023).

A Tabela 2 apresenta um resumo de trabalhos recentes da literatura que empregam cerâmicas adicionadas em antenas e sensores dielétricos. São destacados os materiais utilizados, faixas de frequência operacionais, aplicações práticas e as metodologias envolvidas, evidenciando a diversidade de abordagens e o amadurecimento da área.

Tabela 2 — Aplicações recentes de cerâmicas em antenas e sensores de alta frequência.

Referência	Material Cerâmico	Aplicação	Faixa de Frequência	Técnica
CARMO et al. (2021)	YNbO ₄ –CaYTiNbO ₇	Antena DRA (S e C-band)	3,80 – 5,00 GHz	Hakki–Coleman, HFSS
ZANG et al. (2024)	CaMoO ₄	Cerâmica dielétrica para aplicações em micro-ondas	3-10 GHz	DRX, propriedades dielétricas
ALVES et al. (2024)	LaNbO ₄ + Bi ₂ O ₃	Antena ressoadora dielétrica (DRA) em micro-ondas	4,78 GHz	Medição (Hakki–Coleman)
SWAMI et al. (2025)	La ₂ Ti ₂ O ₇ + Bi ₂ O ₃	Cerâmica funcional para sensores e dispositivos ferroelétricos	10 ² –10 ⁶ Hz	DRX, MEV, espectroscopia dielétrica e de impedância

Fonte: Elaborado pelo autor com base em literatura recente (2021–2025).

Observa-se que materiais como YNbO₄, CaMoO₄ e LaNbO₄ vêm sendo amplamente investigados em distintas faixas espectrais, desde a região óptica até o domínio de micro-ondas, abrangendo aplicações em sensores, dispositivos fotônicos e sistemas de comunicação sem fio. O uso combinado de ferramentas experimentais e computacionais — como DRX, HFSS, MEV e espectroscopias dielétricas — evidencia a integração entre caracterização estrutural e modelagem eletromagnética, reforçando a importância do controle microestrutural e do uso de aditivos para o ajuste fino das propriedades dielétricas (CARMO et al., 2021; ZANG et al., 2024; ALVES et al., 2024; SWAMI et al., 2025).

Além das aplicações em comunicações de micro-ondas, cerâmicas baseadas em ortoniobatos têm sido exploradas em contextos diversos, incluindo sensores de hidrogênio e temperatura, células solares e materiais ferroelétricos funcionais, ampliando de forma significativa o campo de utilização desses compostos (MATHER; FISHER; ISLAM, 2010).

Em perspectiva, o avanço em engenharia microestrutural, rotas de processamento otimizadas e dopagens múltiplas tende a viabilizar o desenvolvimento de materiais cerâmicos estáveis em frequências milimétricas, com potencial aplicação em antenas embarcadas, satélites e sistemas de radar de alta resolução. Nesse contexto, o compósito $\text{LaNbO}_4 + \text{Bi}_2\text{O}_3$ — foco deste trabalho — destaca-se pelo equilíbrio entre permissividade moderada, baixas perdas dielétricas e estabilidade térmica, aliado à sua viabilidade de processamento em temperaturas reduzidas, o que o torna promissor para dispositivos de micro-ondas de alto desempenho.

Por fim, esta fundamentação teórica apresentou os principais conceitos relacionados aos materiais cerâmicos aplicados em dispositivos de micro-ondas, estabelecendo o arcabouço necessário à discussão dos resultados experimentais, os quais serão analisados no capítulo seguinte.

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve os procedimentos experimentais adotados para a síntese, caracterização estrutural e dielétrica, bem como o estudo de simulação numérica dos compósitos cerâmicos de ortoníobato de lantânio (LaNbO_4) adicionado com óxido de bismuto (Bi_2O_3).

5.1 Preparação da matriz cerâmica LaNbO_4 (LNO)

Inicialmente, realizou a síntese do composto cerâmico LaNbO_4 (LNO) através do método reacional do estado sólido de acordo com a seguinte Equação (20):



O composto cerâmico foi sintetizado por meio do processo de reação em estado sólido, utilizando reagentes previamente secos e pesados em proporções estequiométricas. As pesagens foram realizadas em balança analítica de alta precisão, modelo Bioprecisa FA2104N ilustrada na Figura 7.

Figura 7 — Balança analítica Bioprecisa modelo FA2104N.



Fonte: Fotografia do autor (2025), registrada no laboratório do Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

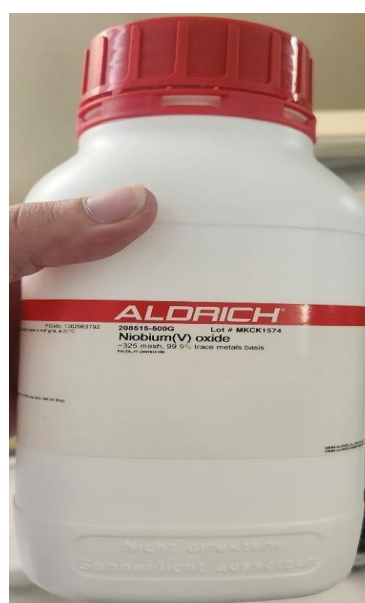
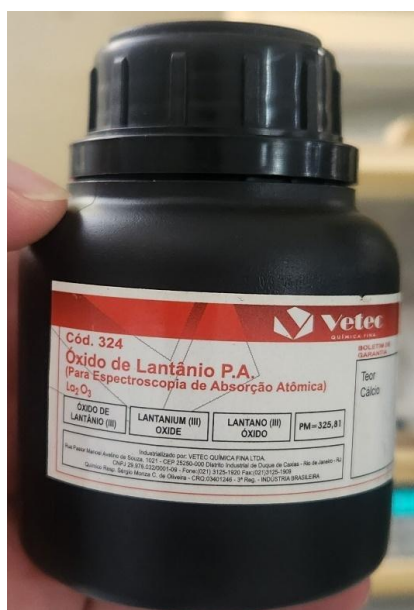
Os reagentes óxido de lantânio (La_2O_3 – Vetec: 99,99% de pureza) e óxido de nióbio (Nb_2O_5 – Aldrich: 99,9% de pureza) foram pesados em quantidades estequiométricas, sem tratamento térmico prévio (Figura 8). Em seguida, a mistura foi acondicionada em um recipiente de poliacetal, em quantidade suficiente para preparar 10 g da composição nominal correspondente ao LaNbO_4 (LNO). Nesse recipiente também foram adicionados 97,8 g de esferas de óxido de zircônio (ZrO_2), indicado na Figura 9, para realizar a moagem dos reagentes. As quantidades utilizadas de cada reagente, conforme a composição nominal desejada, estão apresentadas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 — Proporções estequiométricas e massas utilizadas de reagentes para a síntese do composto LaNbO_4 por reação em estado sólido.

<i>Fase</i>	<i>Massa Molar</i>	<i>Massa (g)</i>
La_2O_3	325,8092	5,5071
Nb_2O_5	265,80976	4,4929

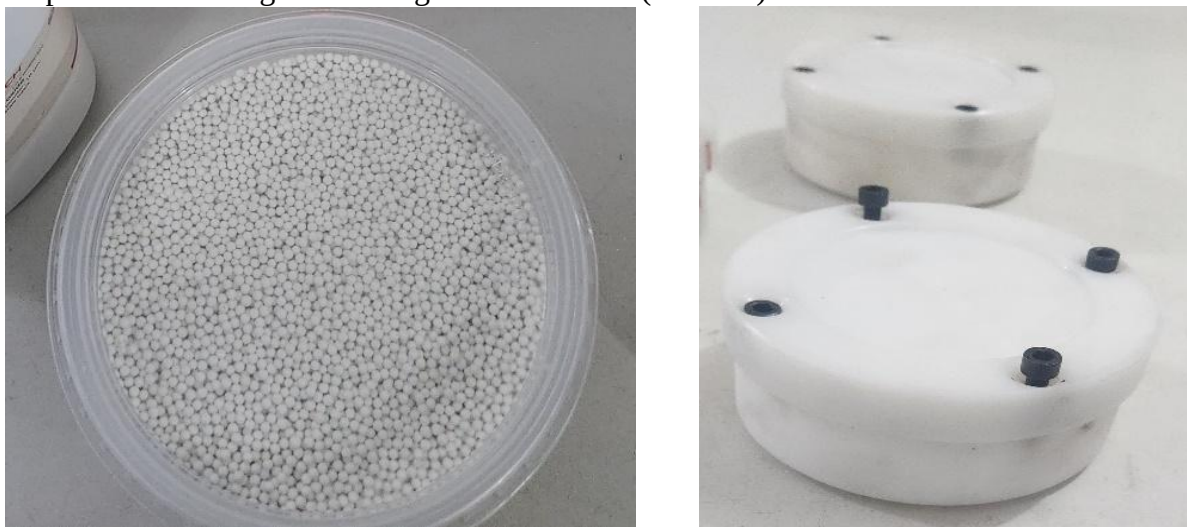
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 — Frascos contendo óxido de lantânio (La_2O_3 – Vetec: 99,99% de pureza) e óxido de nióbio (Nb_2O_5 – Aldrich: 99,9% de pureza) utilizados na síntese da cerâmica fase LaNbO_4 .



Fonte: Fotografia do autor (2025), registrada no laboratório do Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

Figura 9 — Esferas de óxido de zircônio (ZrO_2) utilizadas como meio moedor no processo de homogeneização e moagem dos pós cerâmicos (a esquerda) e recipiente de poliacetal utilizado no processo de moagem dos reagentes cerâmicos (a direita).



Fonte: Fotografia do autor (2025), registrada no laboratório do Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

O processo de moagem foi realizado em moinho planetário Fritsch, modelo Pulverisette 5, a Figura 10 mostra foto do moinho planetário usado na moagem. O processo de moagem foi realizado utilizando uma rotação de 360 rpm por um período de 4 horas. A etapa de moagem tem como objetivo homogeneizar e reduzir o tamanho do grão, causando o aumento da área superficial e diminuição da energia de ativação necessária para a reação entre os reagentes.

Figura 10 — Moinho planetário Fritsch Pulverisette 5, com a câmara de moagem aberta.



Fonte: Fotografia do autor (2025), registrada no laboratório do Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

Após a etapa de moagem dos óxidos, o material foi peneirado para a separação das esferas de óxido de zircônio (ZrO_2). O pó precursor, correspondente à composição nominal do LaNbO_4 , foi então transferido para um cadinho de alumina e submetido ao processo de calcinação a $1100\text{ }^\circ\text{C}$ por 4 horas, com taxa de aquecimento de $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, em forno resistivo da marca JUNG (Figura 11), utilizado para a etapa de sinterização das amostras cerâmicas. O equipamento atinge temperaturas de até $1300\text{ }^\circ\text{C}$. Nessa etapa, ocorre a reação em estado sólido entre o La_2O_3 e o Nb_2O_5 , promovendo a formação da fase cerâmica LaNbO_4 .

Figura 11 — Forno resistivo da marca Jung.



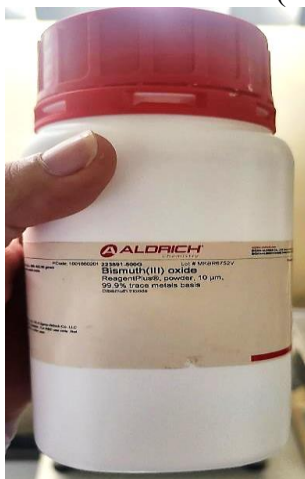
Fonte: Fotografia do autor (2025), registrada no laboratório do Laboratório de telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

5.2 Adição de Óxido de Bismuto (Bi_2O_3)

Após a obtenção da fase cerâmica LNO (LaNbO_4), procedeu-se à adição em massa de óxido de bismuto (Bi_2O_3 – Vetec: 99,9% de pureza) para a obtenção dos compósitos LaNbO_4 - Bi_2O_3 em diferentes concentrações: 2%, 4%, 6%, 8% e 10% m/m. O reagente Bi_2O_3 utilizado neste trabalho é mostrado Figura 12, apresenta pureza de 99,9% e granulometria média de 10 μm , sendo adequado para síntese por reação em estado sólido.

Para cada composição, foram pesados 10 g da mistura LNO + Bi_2O_3 correspondentes a cada compósito preparado. A nomenclatura atribuída para cada amostra é apresentada na Tabela 4.

Figura 12 — Frasco de óxido de bismuto (Bi_2O_3) da marca Aldrich.



Fonte: Fotografia do autor (2025), registrada no laboratório do Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

Tabela 4 — Relação entre a massa dos reagentes LaNbO_4 e Bi_2O_3 utilizada na formulação das amostras com adição, com respectivas nomenclaturas atribuídas.

<i>Peça</i>	<i>LaNbO_4 (g)</i>	<i>Bi_2O_3 (g)</i>	<i>Nomenclatura</i>
<i>LNO</i>	10	0	LNO
<i>LNO+Bi 2%</i>	9,8	0,2	LNOB2
<i>LNO+Bi 4%</i>	9,6	0,4	LNOB4
<i>LNO+Bi 6%</i>	9,4	0,6	LNOB6
<i>LNO+Bi 8%</i>	9,2	0,8	LNOB8
<i>LNO+Bi 10%</i>	9,0	1,0	LNOB10

Fonte: Elaborado pelo autor.

A homogeneização dos compósitos foi conduzida por meio de maceração manual, utilizando almofariz e pistilo de porcelana (Figura 13). Essa etapa foi realizada individualmente para cada composição, com tempo controlado de cinco minutos para cada amostra, de forma a assegurar a uniformidade da mistura das fases LaNbO_4 e Bi_2O_3 .

Figura 13 — Etapa de homogeneização das fases LaNbO_4 e Bi_2O_3 usando almofariz e pistilo de porcelana.



Fonte: Fotografia do autor (2025), registrada no laboratório do Laboratório de telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

5.3 Obtenção dos cilindros cerâmicos

Os materiais previamente homogeneizados foram pesados em porções específicas, determinadas a partir das proporções estequiométricas de LaNbO_4 e Bi_2O_3 . As composições foram preparadas com teores de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% em massa de Bi_2O_3 em relação à matriz LaNbO_4 , garantindo a uniformidade e a reprodutibilidade das amostras. Cada compósito foi inserido no molde metálico cilíndrico (Figura 14) e submetido à prensagem uniaxial em prensa hidráulica da marca Apiguana (Figura 14), sob pressão de 30 MPa por um período de cinco minutos. Esse processo possibilitou a conformação de peças cerâmicas com geometrias cilíndricas e em formato de pastilha que foram submetidas a etapa de sinterização.

Figura 14 — Molde metálico cilíndrico utilizado para prensagem uniaxial das amostras cerâmicas em pastilhas (esquerda). Prensa hidráulica da marca Apiguana utilizada na conformação uniaxial das pastilhas cerâmicas (direita).



Fonte: Fotografia do autor (2025), registrada no laboratório do Laboratório de telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

Após a etapa de prensagem, as amostras foram submetidas à sinterização em forno resistivo da marca JUNG (Figura 11). O tratamento térmico das amostras de LaNbO_4 puro foi conduzido a $1200\text{ }^\circ\text{C}$ por 4 horas, enquanto que, para os compósitos contendo Bi_2O_3 , a temperatura foi reduzida para $1100\text{ }^\circ\text{C}$ por 2 horas, ambos com taxa de aquecimento controlada de $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. Essa diferença decorre do fato de que o Bi_2O_3 , com baixo ponto de fusão ($\sim 825\text{ }^\circ\text{C}$), atua como agente de sinterização por fase líquida, favorecendo a difusão iônica e a densificação em menores temperaturas e tempos de tratamento. Já o LaNbO_4 puro exige temperaturas mais elevadas e maior tempo de patamar para promover a ligação entre grãos e atingir densificação adequada.

Após o ciclo térmico, as amostras permaneceram no interior do forno até o completo resfriamento à temperatura ambiente, a fim de evitar choques térmicos que pudessem comprometer sua integridade. A Figura 15 apresenta as amostras de LNO conformadas no formato cilíndrico logo após a prensagem uniaxial e retirada do molde metálico.

Figura 15 — Peça cerâmica de LNO prensada em formato cilíndrico, correspondente ao elemento ressoador da antena dielétrica, recém-retirada do molde metálico após conformação uniaxial.



Fonte: Fotografia do autor (2025), registrada no laboratório do Laboratório de telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

A literatura reporta que a sinterização do LaNbO_4 puro é geralmente realizada usando temperaturas superiores a $1250\text{ }^\circ\text{C}$ (WU et al., 2009; GUO et al., 2017). No presente trabalho, a amostra de LaNbO_4 puro foi sinterizada a $1200\text{ }^\circ\text{C}$ por 4 horas, valor ligeiramente inferior ao usualmente empregado, mas suficiente para a obtenção de peças densas. Nos compósitos contendo Bi_2O_3 , a presença do aditivo possibilitou reduzir a temperatura de sinterização para $1100\text{ }^\circ\text{C}$ e o tempo de patamar para 2 horas, mantendo a densificação adequada. Durante o processo térmico, o Bi_2O_3 forma uma fase líquida transiente, que facilita a difusão entre partículas e promove a densificação em temperaturas mais baixas.

Para efeito de comparação, os resultados das amostras adicionadas de Bi_2O_3 foram confrontados com os obtidos para o LaNbO_4 puro sinterizado a $1200\text{ }^\circ\text{C}$, utilizando o mesmo protocolo experimental. Nessa condição, obteve-se uma peça com densificação e estabilidade microestrutural, conforme confirmado pela análise estrutural por DRX (Figura 20 e Figura 21; Tabela 5). Essas análises confirmaram a formação da fase monoclinica característica do LaNbO_4 , sem a presença de fases secundárias.

A Figura 16 ilustra as amostras cilíndricas após a sinterização, as peças foram posicionadas sobre placa refratária, nas quais se observa superfície uniforme e integridade física adequada, características compatíveis com o uso em ressoadores dielétricos.

Figura 16 — Amostras cerâmicas cilíndricas (antenas dielétricas) após o processo de sinterização.



Fonte: Fotografia do autor (2025), registrada no laboratório do Laboratório de telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

5.4 Difração de Raio-X

A caracterização estrutural das amostras cerâmicas foi realizada por meio de difração de raios X (DRX), utilizando-se material sinterizado previamente fragmentado e moído até a forma de pó, de modo a garantir maior homogeneidade e minimizar efeitos de orientação preferencial durante a análise. As análises foram conduzidas no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC), empregando-se um difratômetro Rigaku D/max-B da Panalytical, com radiação $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1,540598 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 40 mA na geometria Bragg–Brentano.

As medidas foram obtidas em temperatura ambiente ($\sim 26^\circ\text{C}$), na faixa angular 2θ de 20° a 70° , com passo de $0,013^\circ$ e velocidade de varredura de $0,5^\circ/\text{min}$. A identificação das fases cristalinas foi realizada por meio de comparação com padrões do banco de dados ICSD (Inorganic Crystal Structure Database). Para análise quantitativa e refinamento estrutural, utilizou-se o método de Rietveld com o software DBWS Tools 2.3, com o objetivo de confirmar a obtenção da fase desejada (LaNbO_4), determinar os parâmetros de rede (a , b , c , volume) e verificar a presença de eventuais fases secundárias.

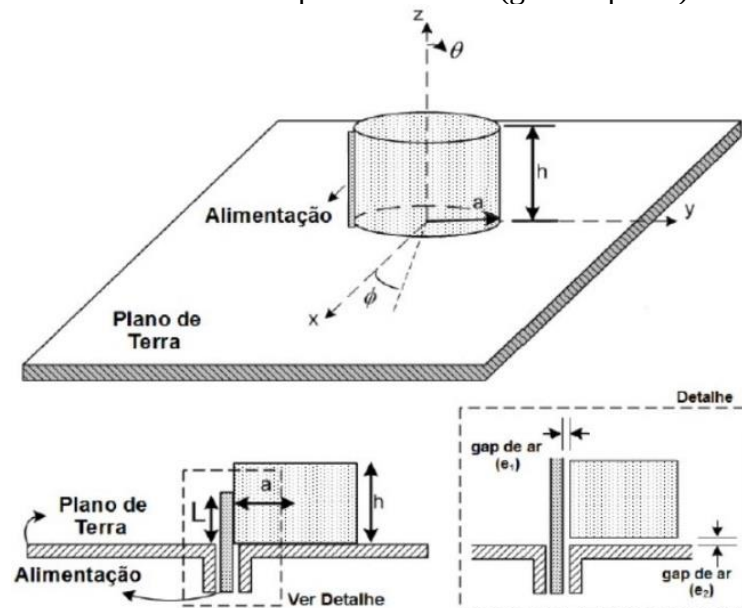
5.5 Medidas Dielétricas em Micro-ondas

As propriedades dielétricas das amostras cerâmicas, como a permissividade relativa (ϵ_r) e a tangente de perdas dielétricas ($\text{tg } \delta$), foram determinadas por meio da técnica de Hakki–Coleman modificada, em temperatura ambiente ($\sim 26^\circ\text{C}$). As medições foram realizadas utilizando analisadores de rede vetorial da marca Agilent (modelo PNA N5230A), acoplados a

um suporte de cavidade ressonante para excitação do modo TE_{011} . As amostras, conformadas em formato cilíndrico após a etapa de sinterização, também foram submetidas a medidas de monopolo para obtenção do coeficiente de reflexão (S_{11}) e das impedâncias real (Z') e imaginária (Z''), permitindo uma caracterização completa do comportamento eletromagnético das amostras na faixa de micro-ondas. A frequência de ressonância (f_0) foi determinada a partir do mínimo do parâmetro S_{11} , correspondente à máxima transferência de energia entre a amostra e o campo eletromagnético.

A Figura 17 apresenta o esquema típico de uma antena ressoadora dielétrica (DRA) cilíndrica excitada por monopolo metálico, montada sobre plano condutor. O ressonador cerâmico possui dimensões geométricas bem definidas (raio a e altura h). As vistas laterais mostram o detalhe do gap de ar (e) entre a base do cilindro cerâmico e o plano de terra, o qual influencia a impedância de entrada e o acoplamento da antena. A presença de um pequeno espaçamento de ar (*gap*) entre a base do ressonador e o plano de terra é crucial para o ajuste da impedância de entrada da antena e, conseqüentemente, para a eficiência de radiação do sistema.

Figura 17 — Geometria típica de antena ressoadora dielétrica cilíndrica montada sobre plano condutor (ground plane).

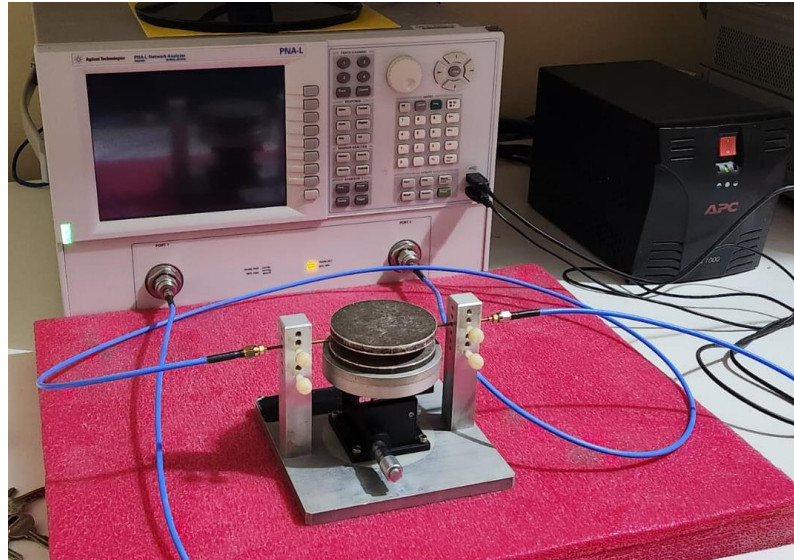


Fonte: Adaptado de Kwon e Lee (2010).

A caracterização dielétrica foi realizada pelo método de Hakki–Coleman, no qual a frequência de ressonância (f_0) é utilizada para o cálculo da permissividade relativa (ϵ_r) a partir das dimensões do ressonador, enquanto o fator de qualidade (Q) do modo excitado permite determinar a tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$). A Figura 18 apresenta o sistema experimental

empregado nas medições, destacando o analisador vetorial de redes Agilent PNA N5230A acoplado à cavidade ressonante circular, na qual foram posicionadas as amostras cerâmicas.

Figura 18 — Analisador de redes vetorial Agilent PNA N5230A com montagem experimental para excitação do modo TE_{011}



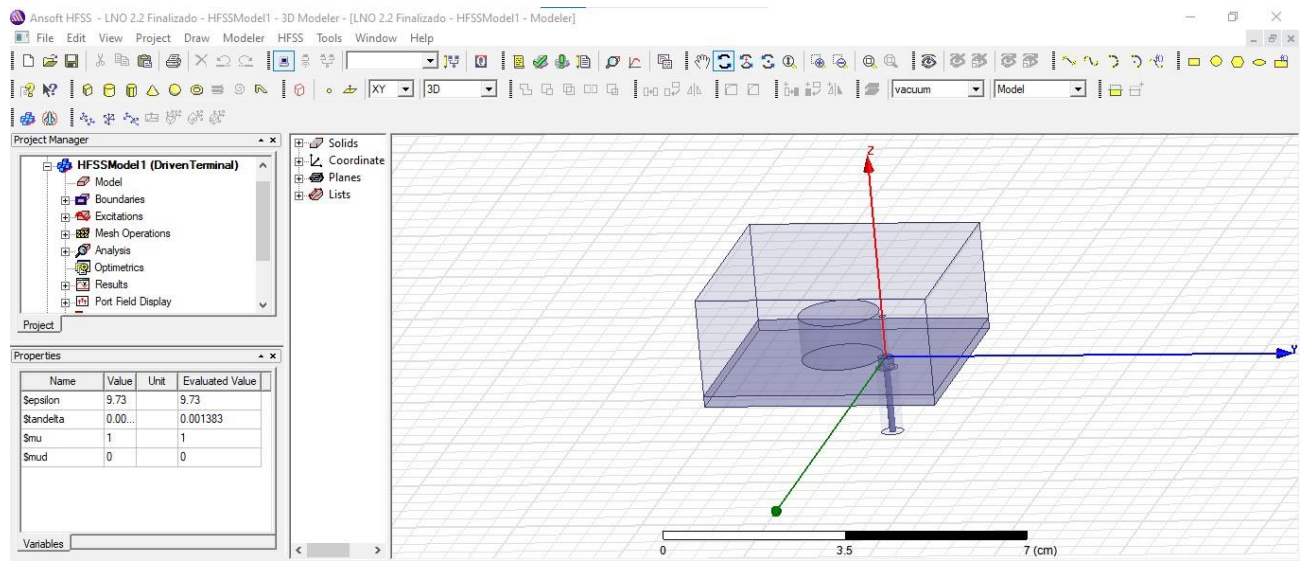
Fonte: Fotografia do autor (2025), registrada no laboratório do Laboratório de telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

5.6 Simulação Numérica Computacional

Com o objetivo de validar o desempenho das amostras cerâmicas como antenas ressoadoras dielétricas (DRAs) foi realizada simulação numérica utilizando o software HFSS® (High Frequency Structure Simulator) da Ansys. Este software é amplamente utilizado no design de antenas, estudo e elaboração de elementos complexos de circuitos eletrônicos de RF, incluindo filtros e linhas de transmissão. A Figura 19 mostra o modelo computacional tridimensional da DRA cilíndrica implementada no software HFSS®, sendo que os parâmetros geométricos das amostras e as propriedades dielétricas permissividade dielétrica (ϵ_r), tangente de perdas ($\tan \delta$) são inseridas inicialmente no software. Após essa etapa inicial, são feitas alterações nos gaps de ar entre a interface do cilindro testado com o plano de terra, bem como do cilindro com o probe coaxial de excitação de forma a aproximar o modelo teórico dos dados experimentais.

A validação dos resultados simulados foi realizada por meio da comparação com os dados experimentais de coeficiente de reflexão (S_{11}) e impedância real (Z') e imaginária (Z''), sendo que após validado o modelo teórico os parâmetros de campo distante: ganho, diretividade, eficiência de radiação e diagrama de radiação podem ser obtidos.

Figura 19 — Modelo tridimensional da antena DRA cilíndrica implementado no software HFSS®.



Fonte: Captura de tela do autor (2025).

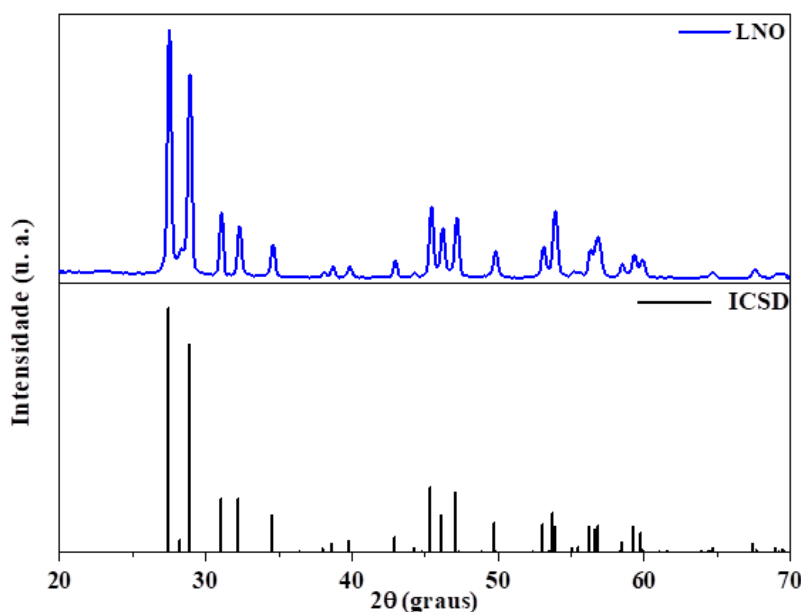
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados experimentais obtidos a partir das análises estruturais, microestruturais, dielétricas, bem como de simulação numérica realizado para os compósitos $\text{LaNbO}_4 - \text{Bi}_2\text{O}_3$.

6.1 Difração de raios-X

O difratograma obtido para a amostra de LNO sintetizada é apresentado na Figura 20, onde é apresentada a comparação entre medida da amostra com o banco de dados do ICSD. Ao se realizar uma análise qualitativa da figura é possível verificar que existe uma grande concordância entre os picos de difração da amostra em relação ao da microficha do ICSD, não sendo observado outros picos de difração além daqueles relacionados a fase LaNbO_4 . Esse resultado indicaria que a fase cerâmica LNO foi obtida sem a formação de fases espúrias.

Figura 20 — Padrão de difração da amostra de LNO calcinada a 1200°C e da microficha ICSD 081616.



Fonte: Captura de tela do autor (2025).

O refinamento de Rietveld para a amostra LNO foi empregado para confirmar a obtenção da fase cerâmica e confirmar a presença ou não de fases espúrias (impurezas). Os parâmetros de refinamento obtidos para essa amostra são demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 — Parâmetros de refinamento de Rietveld obtidos para a amostra de LNO sintetizado.

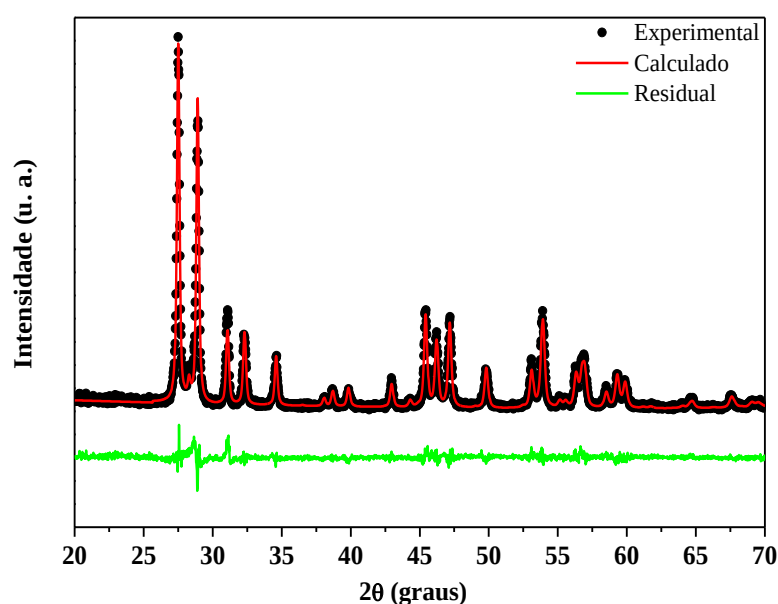
a	5,5556Å	b	5,2011Å	c	11,5237Å
α	90,00°	β	86,03°	γ	90,00°
R _{Bragg}	5,60%	R _{wp}	9,76%	S	1,43%

Fonte: Medidas experimentais do autor.

Para que o refinamento de Rietveld de um material possa ser considerado adequado é preciso que os valores dos parâmetros estejam dentro de uma faixa de confiabilidade de acordo com o parâmetro analisado. No caso do parâmetro R_{wp} são considerados aceitáveis valores entre a faixa 10 e 20%; para o fator de qualidade S, os valores devem se encontrar entre 1,0 e 1,5% , e para o parâmetro R_{Bragg}, os valores devem ser inferiores a 9% (YOUNG, 1993; PECHARSKY; ZAVALIJ, 2005).

No caso do refinamento a amostra de LNO, os valores dos parâmetros se encontraram nas faixas citadas anteriormente confirmando que o refinamento realizado é confiável, e que o LNO é a única fase cerâmica presente na amostra sintetizada nesse trabalho. A Figura 21 apresenta o difratograma refinado demonstrando a diferença residual entre os valores experimental e calculado obtido pelo refinamento de Rietveld, onde se observa que em praticamente todos os picos a diferença residual é muita pequena, confirmando que o refinamento do LNO é confiável.

Figura 21 — Diferença entre os valores experimental e calculado obtido a partir do refinamento de Rietveld.

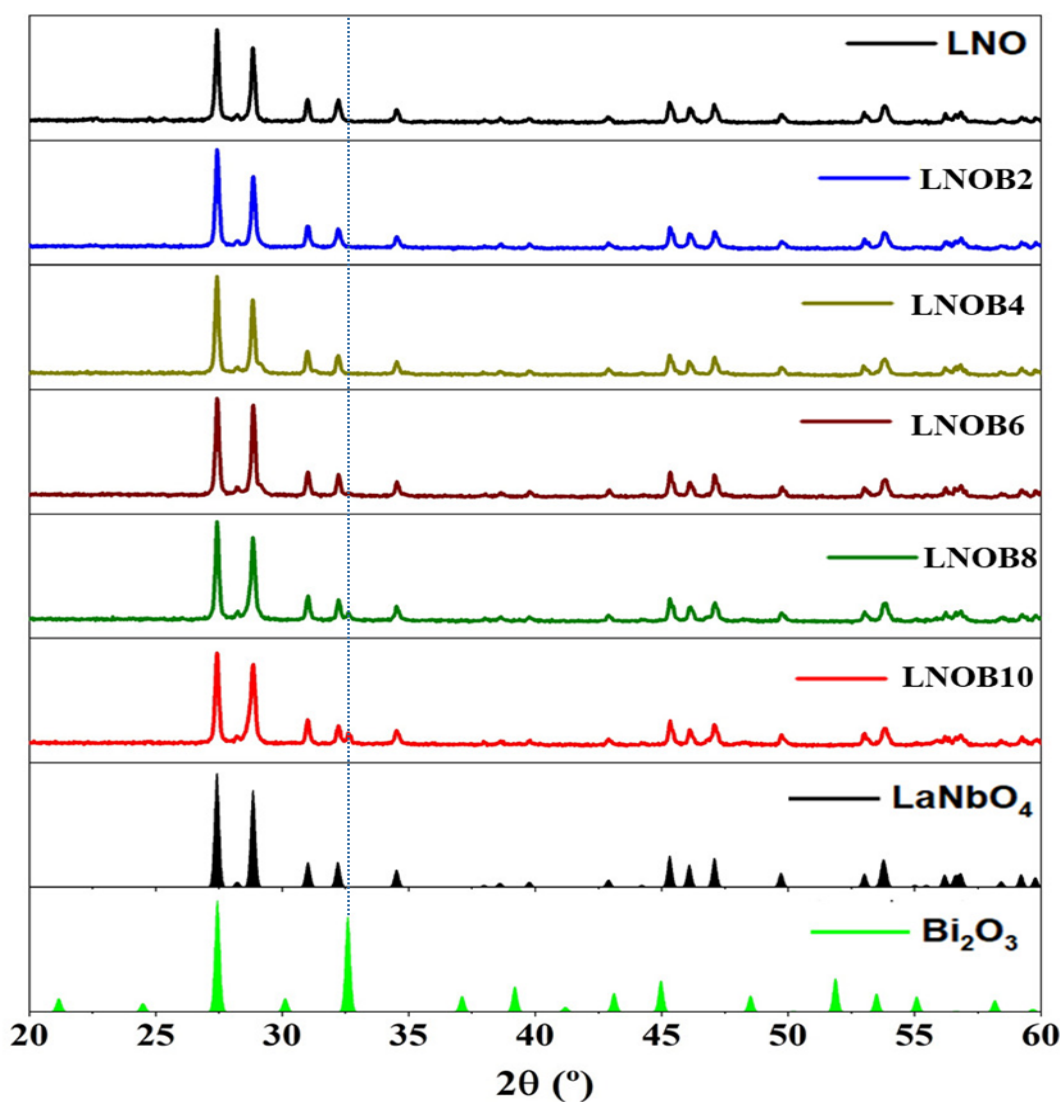


Fonte: Medidas do autor.

Após confirmada a obtenção da cerâmica LNO como uma fase pura, sem a presença de fases secundárias ou espúrias, os compósitos com Bi_2O_3 também foram analisados pela técnica de difração de raios-X. O difratograma comparativo contendo todas as amostras compósitos é apresentado na Figura 22 junto com os padrões de difração de LaNbO_4 (ICSD 081616) e Bi_2O_3 (ICSD 002376). É possível observar que os compósitos apresentam perfis parecidos aos da amostra de LNO pura e ICSD 081616, indicando que não houve a formação de fases secundárias uma vez que o perfil de difração do padrão do ICSD 002376 que corresponde ao Bi_2O_3 é similar ao do LaNbO_4 .

Ainda com relação a Figura 22, é possível verificar que a partir da amostra LNOB6 observa-se o surgimento de um pico de difração em torno de $32,5^\circ$ que corresponderia ao Bi_2O_3 , confirmando que não houve reação química entre as fases LaNbO_4 e Bi_2O_3 .

Figura 22 — Difratograma comparativo dos compósitos $\text{LaNbO}_4 - \text{Bi}_2\text{O}_3$.



Fonte: Medidas do autor.

6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

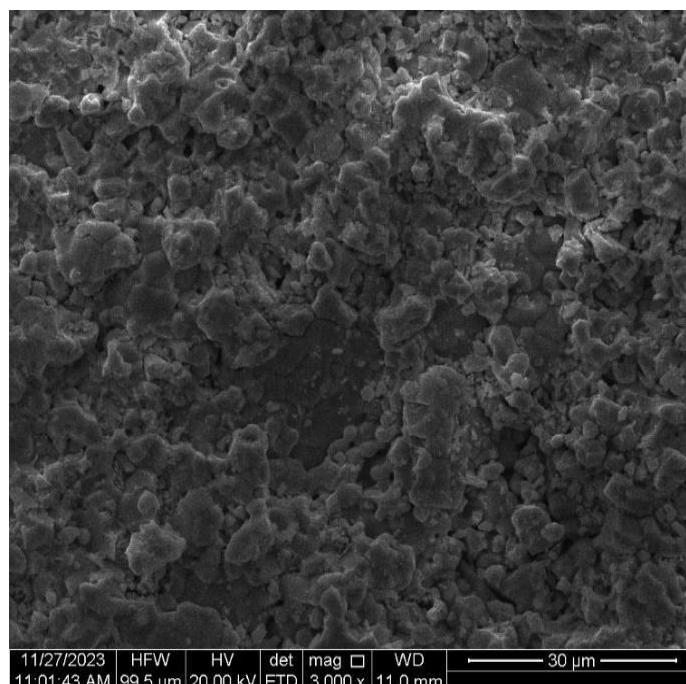
A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica amplamente utilizada na caracterização de materiais cerâmicos, permitindo a observação detalhada da topografia e da microestrutura das amostras com alta resolução. Por meio do bombardeio da superfície com um feixe focalizado de elétrons e da detecção dos elétrons retroespalhados e secundários, é possível obter imagens com contraste de fases, formas de grão, porosidade e evidências de sinterização. A análise microestrutural fornece informações valiosas para a correlação com propriedades funcionais, como permissividade dielétrica, perdas por polarização e estabilidade térmica.

A Microscopia foi empregada para analisar a microestrutura superficial das amostras de LaNbO_4 puro, sinterizadas a 1200°C , e das amostras de LaNbO_4 adicionadas de Bi_2O_3 , sinterizadas a 1100°C . As micrografias foram obtidas com aumento de $3000\times$, usando feixe de 20 kV.

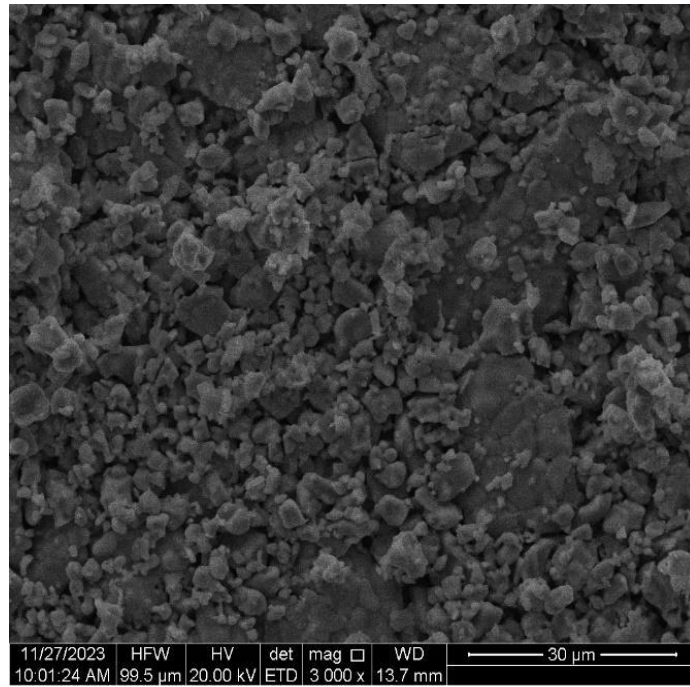
A Figura 23 a-f, apresentam as micrografias obtidas por MEV para as diferentes composições analisadas. De modo geral, todas as amostras apresentaram microestrutura com contornos de grão bem definidos e apresentaram morfologia predominante dos grãos do tipo equiaxial, levemente irregular.

Figura 23 — Micrografia MEV das amostras LaNbO_4 puro e das amostras de LaNbO_4 adicionadas de Bi_2O_3 , ($3000\times$).

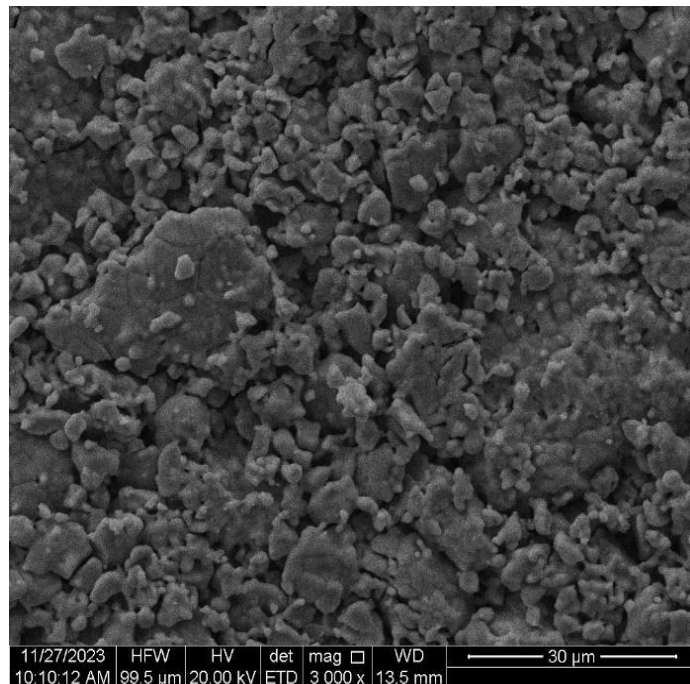
a) LNO



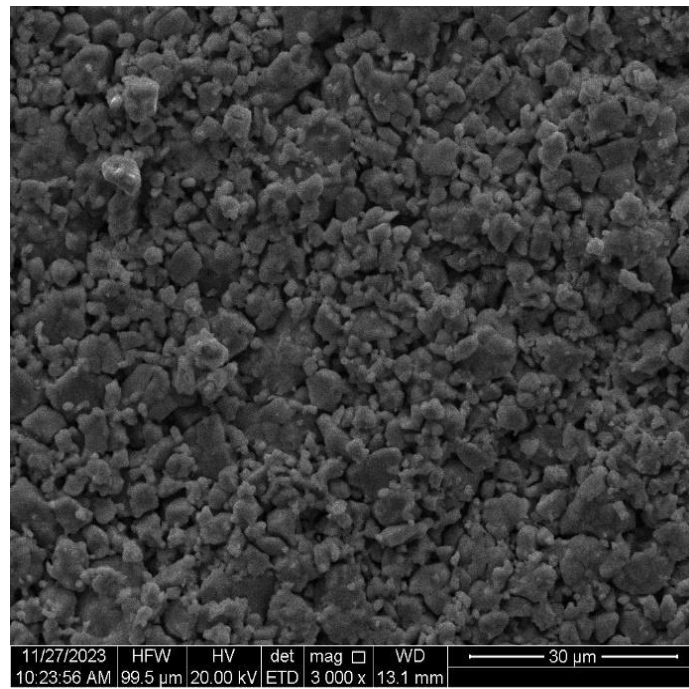
b) LNOB2



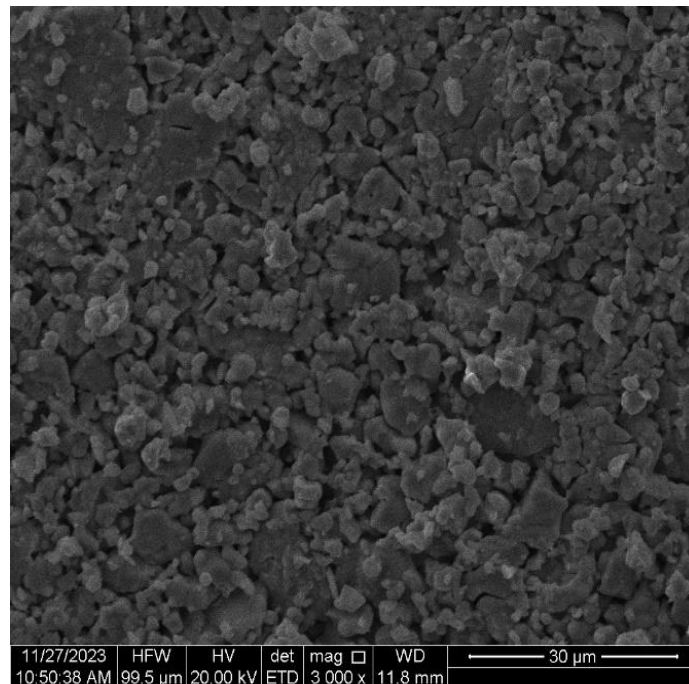
c) LNOB4



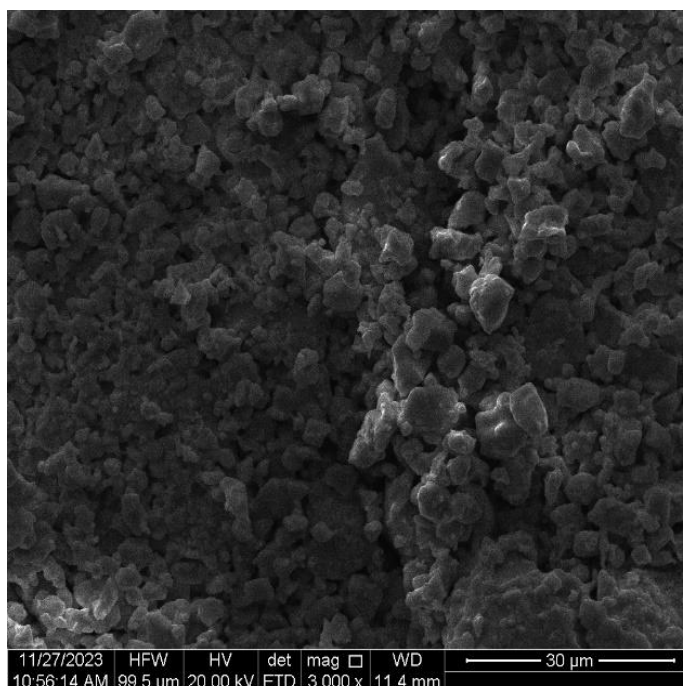
d) LNOB6



e) LNOB8



f) LNOB10



Fonte: Arquivo experimental do autor (2025).

A análise quantitativa do tamanho médio de grão obtida a partir das micrografias revelou que o LaNbO_4 puro apresentou grãos na faixa submicrométrica ($\sim 0,63 \mu\text{m}$). Com a adição de até 6% de Bi_2O_3 , foi observada uma leve redução e estabilização no tamanho médio dos grãos ($\sim 0,57 - 0,59 \mu\text{m}$), indicando que o Bi_2O_3 atuou como agente de densificação, favorecendo a difusão interparticular e a consolidação da microestrutura sem promover crescimento expressivo de grão. Esse comportamento confirma que, em teores moderados, o Bi_2O_3 forma uma fase líquida transiente suficiente para facilitar o rearranjo das partículas, sem comprometer a uniformidade da microestrutura.

Por outro lado, a partir da adição de 8% e, sobretudo, 10% mol de Bi_2O_3 , verificou-se uma tendência acentuada de crescimento de grão, atribuída ao excesso de fase líquida gerada durante a sinterização.

Em concentrações elevadas, a maior quantidade de Bi_2O_3 reduz a viscosidade da fase líquida e aumenta a mobilidade intergranular, promovendo coalescência acelerada e crescimento descontínuo de grãos. Além disso, a segregação de Bi_2O_3 nas bordas de grão pode diminuir a energia interfacial local e estimular o crescimento orientado, resultando em uma microestrutura mais grosseira e heterogênea (DUAN et al., 2024; SWAMI et al., 2025).

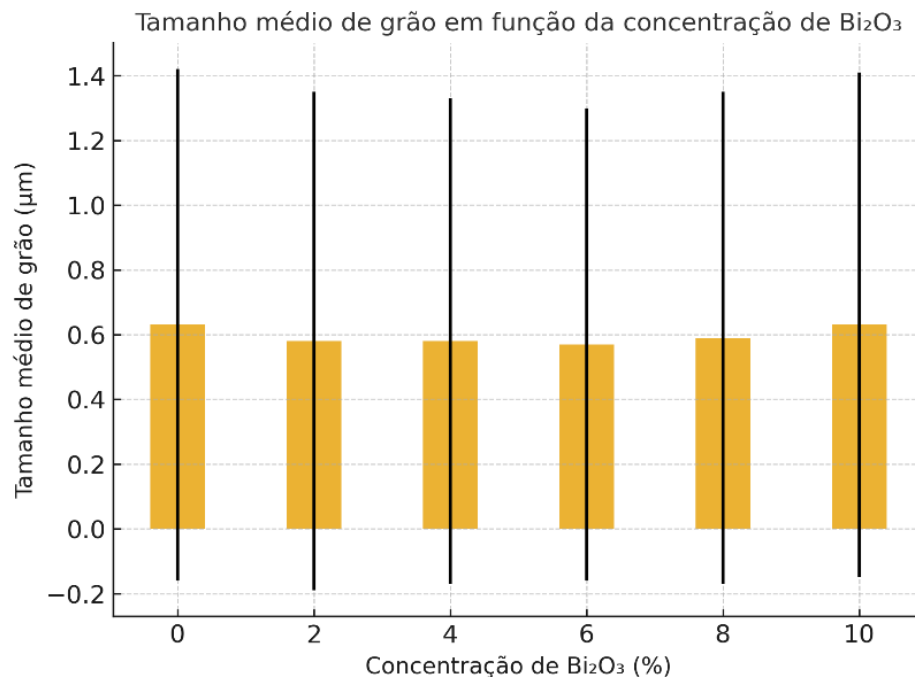
Esse aumento do tamanho de grão, entretanto, não implicou melhora adicional na densificação. Apesar de a fase líquida favorecer o adensamento inicial, o crescimento excessivo reduz o número de fronteiras ativas e diminui o fluxo difusivo responsável pelo fechamento dos

poros residuais. Como consequência, parte desses poros permanece aprisionada nas junções de grãos, limitando a densificação final nas amostras com maiores teores de Bi_2O_3 . Dessa forma, verifica-se que o teor ótimo de adição se situa entre 4 % e 6 % mol, intervalo no qual há equilíbrio entre densificação eficiente e controle do crescimento de grão.

Resultados semelhantes foram reportados por Wu et al. (2009) e Guo et al. (2017), que associaram o crescimento controlado de grãos e a eliminação de porosidade a melhorias no fator de qualidade ($Q \times f$) e na estabilidade dielétrica de compósitos à base de ortonióbato.

A Figura 24 apresenta o resumo quantitativo do tamanho médio de grão das amostras, evidenciando a estabilização até 6% de Bi_2O_3 e o crescimento acentuado nas composições com 8% e 10%, comportamento diretamente associado ao equilíbrio entre o volume de fase líquida e a eficiência de adensamento durante a sinterização.

Figura 24 — Tamanho médio de grão em função da concentração de Bi_2O_3 , obtido a partir da análise digital das micrografias de MEV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

6.3 Densificação Relativa das Amostras

Os resultados de densificação relativa obtidos para as amostras estão apresentados na Tabela 6, que reúne as dimensões geométricas, massas, densidades experimentais, densidades teóricas calculadas pela regra das frações mássicas e os valores finais de densificação relativa das amostras de LaNbO_4 puro e adicionadas com Bi_2O_3 .

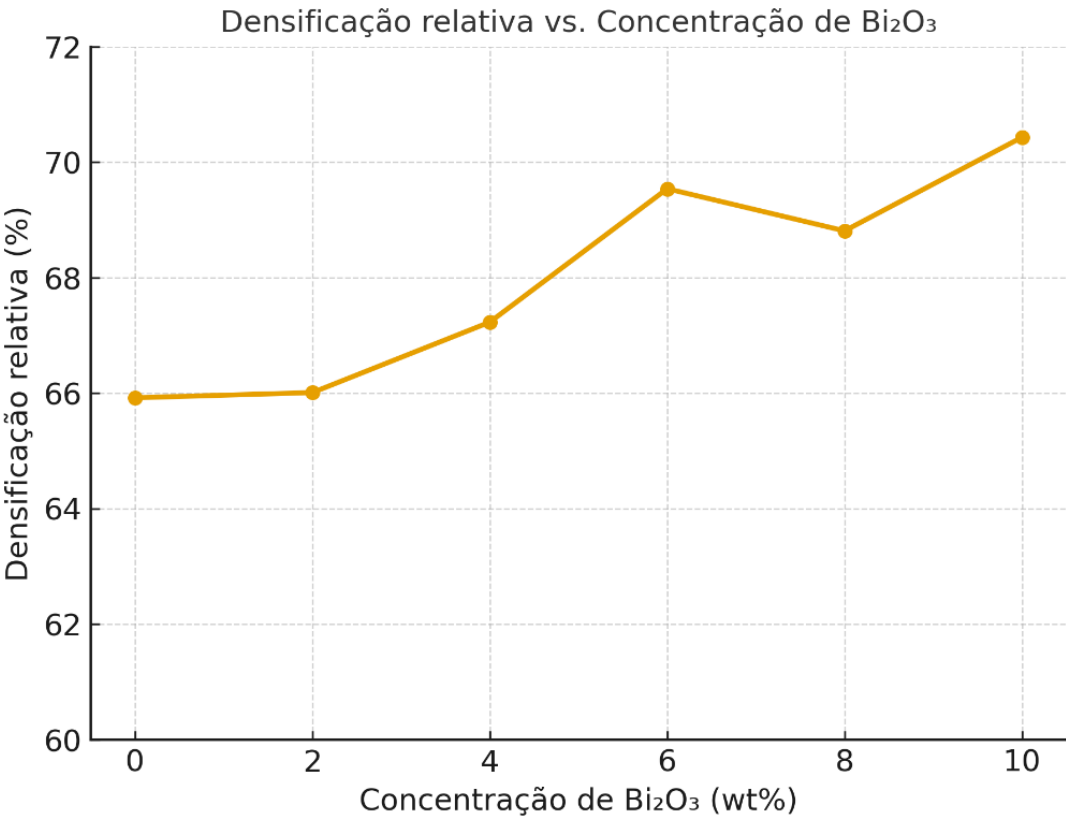
Tabela 6 — Valores de altura, diâmetro, massa, volume, densidade experimental, densidade teórica e densificação relativa das amostras de LaNbO_4 puro e adicionadas com Bi_2O_3 .

Amostra	Bi_2O_3 (m/m %)	h (mm)	d (mm)	Massa (g)	Volume (cm^3)	ρ_{exp} (g/cm^3)	ρ_{teo} (g/cm^3)	Densificação (%)
LNO	0	8,28	14,50	5,32	1,37	3,89	5,90	65,92
LNOB2	2,0	8,86	15,84	6,85	1,75	3,92	5,94	66,01
LNOB4	4,0	8,70	15,74	6,81	1,69	4,03	5,99	67,23
LNOB6	6,0	8,45	15,66	6,83	1,63	4,19	6,03	69,54
LNOB8	8,0	8,81	15,66	7,10	1,70	4,18	6,08	68,81
LNOB10	10,0	8,91	15,54	7,29	1,69	4,31	6,12	70,43

Fonte: Arquivo experimental do autor (2025)

A variação da densificação relativa em função da concentração de Bi_2O_3 pode ser visualizada na Figura 25.

Figura 25 — Densificação relativa (%) em função da concentração de Bi_2O_3 .



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como mostrado na Tabela 6 e ilustrado na Figura 25, o LaNbO_4 puro apresentou densificação de aproximadamente 66%. Com a adição de Bi_2O_3 , verificou-se um aumento gradual na densificação até 6% mol, alcançando cerca de 69,5% em LNOB6, resultado do efeito fundente do Bi_2O_3 sobre o processo de sinterização. Em teores superiores, especialmente em 8% e 10%, os valores tenderam à estabilização, indicando que o aumento do volume de fase líquida não proporcionou ganhos adicionais de densificação.

Essa tendência evidencia um ponto ótimo de adição em torno de 4–6% mol, no qual a mobilidade atômica promovida pela fase líquida favorece a difusão sem provocar crescimento excessivo de grão ou aprisionamento de poros. A correlação entre maior densificação e menor tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$) observada nas composições intermediárias reforça a influência direta da microestrutura compacta sobre o desempenho dielétrico. (SEBASTIAN; JANTARPEDI, 2008; GUO et al., 2017).

6.4 Estudos das propriedades elétricas na região de micro-ondas

A avaliação das propriedades dielétricas das amostras foi realizada na região de micro-ondas utilizando a técnica de Hakki–Coleman. Os parâmetros determinados incluíram a permissividade relativa (ϵ_r), a tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$), o fator de qualidade ($Q \times f$), a frequência de ressonância (f_0) e, adicionalmente, o coeficiente térmico da frequência de ressonância (τ_f), permitindo uma análise mais abrangente da estabilidade térmica dos materiais. Os resultados obtidos encontram-se resumidos na Tabela 7.

Tabela 7 — Propriedades físicas e dielétricas das amostras de LaNbO_4 puras e adicionadas com diferentes concentrações de Bi_2O_3 .

Amostra	D (mm)	H (mm)	ϵ_r	$\tan \delta$	f (GHz)	$Q \times f$ (GHz)	τ_f (ppm/°C)
LNO	14,50	8,28	10,37	$2,535 \cdot 10^{-3}$	7,83	3091,91	9
LNOB2	15,84	8,86	10,63	$1,383 \cdot 10^{-3}$	7,50	5428,54	12,98
LNOB4	15,74	8,70	11,30	$8,701 \cdot 10^{-4}$	7,42	8527,55	20,82
LNOB6	15,66	8,45	12,91	$3,968 \cdot 10^{-3}$	7,08	1784,99	16,13
LNOB8	15,66	8,81	13,50	$3,801 \cdot 10^{-3}$	6,76	1780,53	24,01
LNOB10	15,54	8,91	14,78	$5,765 \cdot 10^{-3}$	6,45	1119,44	21,38

Fonte: Próprio do autor (2025).

Observa-se que a adição de Bi_2O_3 promoveu um incremento gradual na permissividade relativa (ϵ_r) dos compósitos, atingindo valores máximos para a concentração de 10% m/m. Esse aumento pode ser atribuído pelo fato do Bi_2O_3 adicionado apresentar permissividade em torno de 33,45 que é um valor maior do que a permissividade da fase LNO (DUAN et al., 2024; SWAMI et al., 2025).

Por outro lado, os valores de perda dielétrica ($\text{tg } \delta$) das amostras apresentaram comportamento não linear, onde foi observado valores na ordem de 10^{-3} , com exceção da amostra LNOB4 que apresentou o valor de $8,70 \cdot 10^{-4}$ sendo a amostra com o menor valor de perda dentre os compósitos. Ainda com relação a Tabela 7 foi possível observar que a LNOB4 apresentou o maior valor do fator de qualidade ($Q \times f$) onde foi observado o valor de 8527,55 GHz.

As amostras contendo Bi_2O_3 apresentaram desempenho dielétrico superior ao LaNbO_4 puro. Dentre elas, LNOB4 exibiu o melhor equilíbrio entre baixas perdas ($\text{tg } \delta = 8,70 \times 10^{-4}$) e estabilidade estrutural, configurando-se como o ponto ótimo de adição para aplicações em dispositivos de micro-ondas.

Em relação ao coeficiente térmico da frequência de ressonância (τ_f), observou-se que os valores permaneceram sempre positivo após a adição de Bi_2O_3 . A amostra de LNO puro apresentou $\tau_f = +9,00 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, valor consistente com a literatura (Nascimento, 2019; Sebastian e Jantarpedi, 2008).

Apesar de os valores de τ_f obtidos situarem-se fora da faixa considerada ideal para aplicações em micro-ondas (-10 a $+10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$), observa-se que a adição de Bi_2O_3 não promoveu variações significativas nesse parâmetro. Esse comportamento pode ser atribuído à baixa fração molar adicionada (2–10%) e ao fato de o Bi_2O_3 atuar predominantemente como agente fundente, formando fase líquida superficial sem alterar a estrutura cristalina do LaNbO_4 . Embora o Bi_2O_3 apresente, em geral, coeficientes térmicos positivos elevados (na faixa de $+100$ a $+400 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$), sua baixa incorporação estrutural explica a estabilidade relativa dos valores de τ_f obtidos.

Assim, os resultados reforçam o potencial da matriz $\text{LaNbO}_4\text{--Bi}_2\text{O}_3$ como base para formulações otimizadas em futuros estudos, voltadas ao ajuste fino da estabilidade térmica por meio de dopagens ou composições compensadoras.

6.5 Simulação Numérica

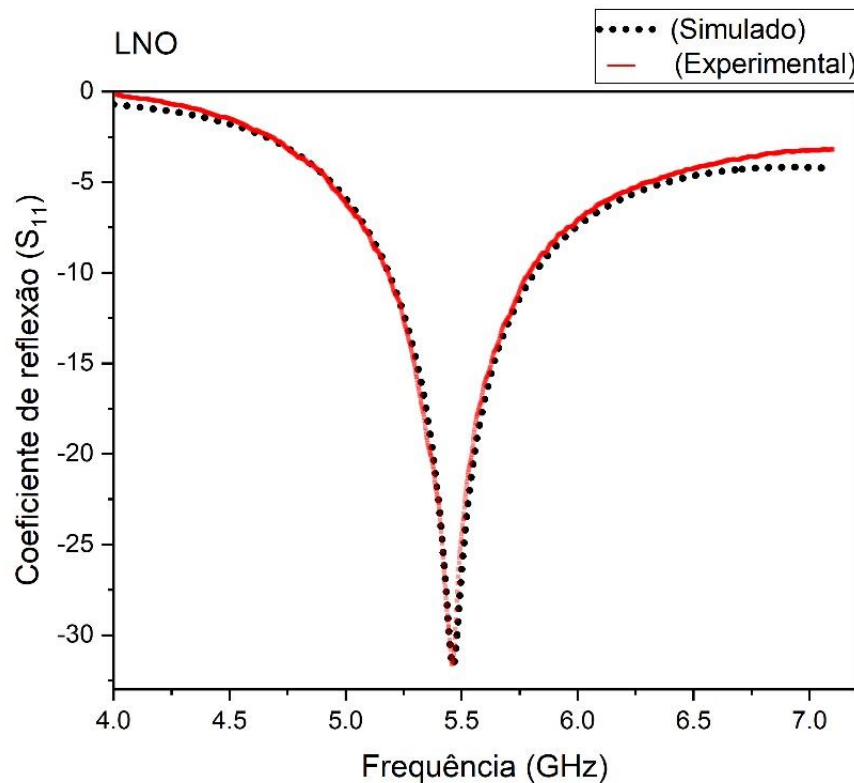
Após a obtenção das propriedades dielétricas foram realizadas simulações numéricas utilizando o software HFSS® para avaliar o desempenho das amostras como antenas ressoadoras dielétricas (DRAs). As simulações consideraram as dimensões geométricas dos cilindros cerâmicos, os valores experimentais de ϵ_r e $\tan \delta$ e gaps de ar entre o ressonador e o plano de terra, sendo que para validar o modelo teórico foram comparados resultados experimentais e teóricos do coeficiente de reflexão (S_{11}), a impedância real (Z') e a impedância imaginária (Z'').

A Figura 26 a-f apresenta as curvas do coeficiente de reflexão (S_{11}) obtidas experimentalmente e por simulação para todas as amostras, evidenciando forte concordância entre os resultados, o que confirma a confiabilidade do modelo numérico empregado.

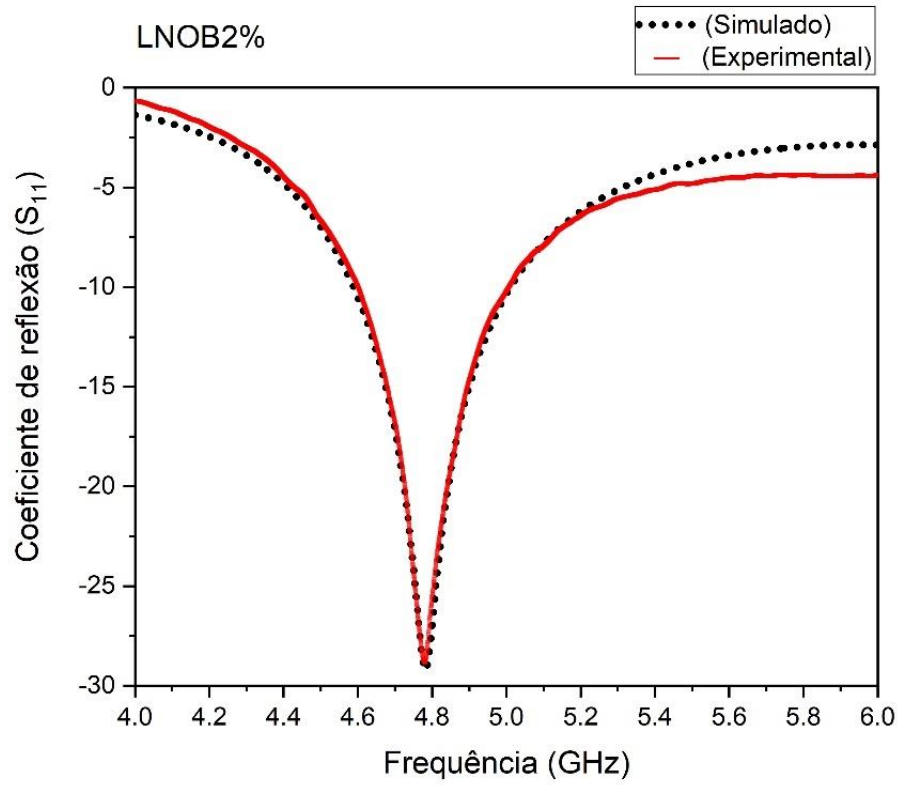
Observa-se que todas as composições apresentaram valores de S_{11} inferiores a -10 dB, indicando bom acoplamento eletromagnético e resposta ressonante bem definida, requisitos fundamentais para o uso de materiais cerâmicos como elementos de antenas ressoadoras dielétricas.

Figura 26 — Curvas de coeficiente de reflexão (S_{11}) simuladas e experimentais, para as amostras cerâmicas e as adicionadas com Bi_2O_3 .

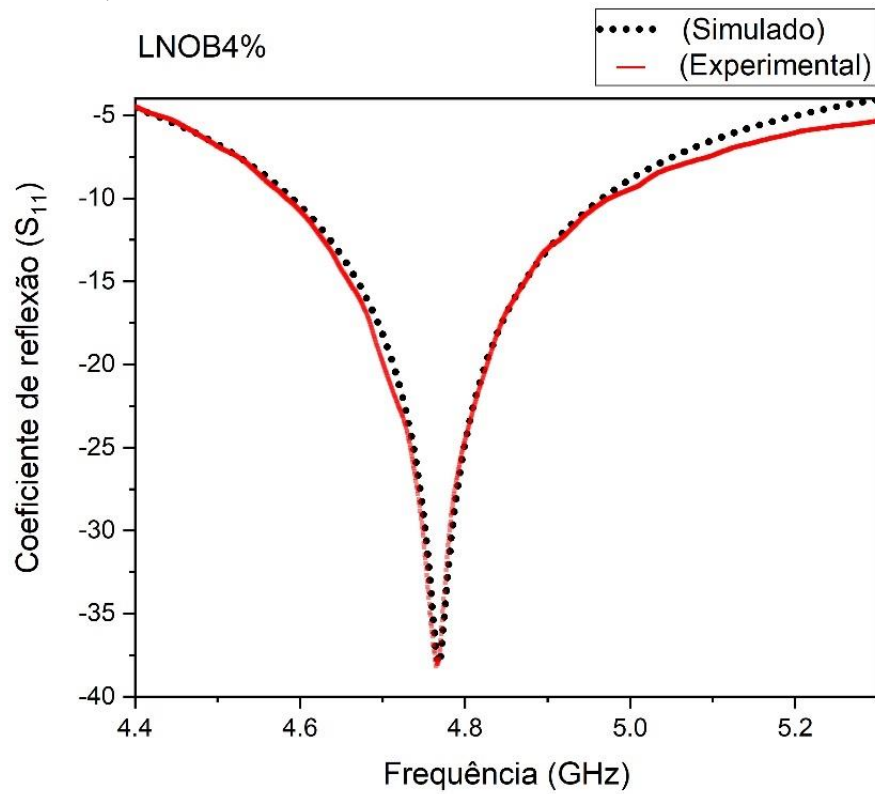
a) LNO;



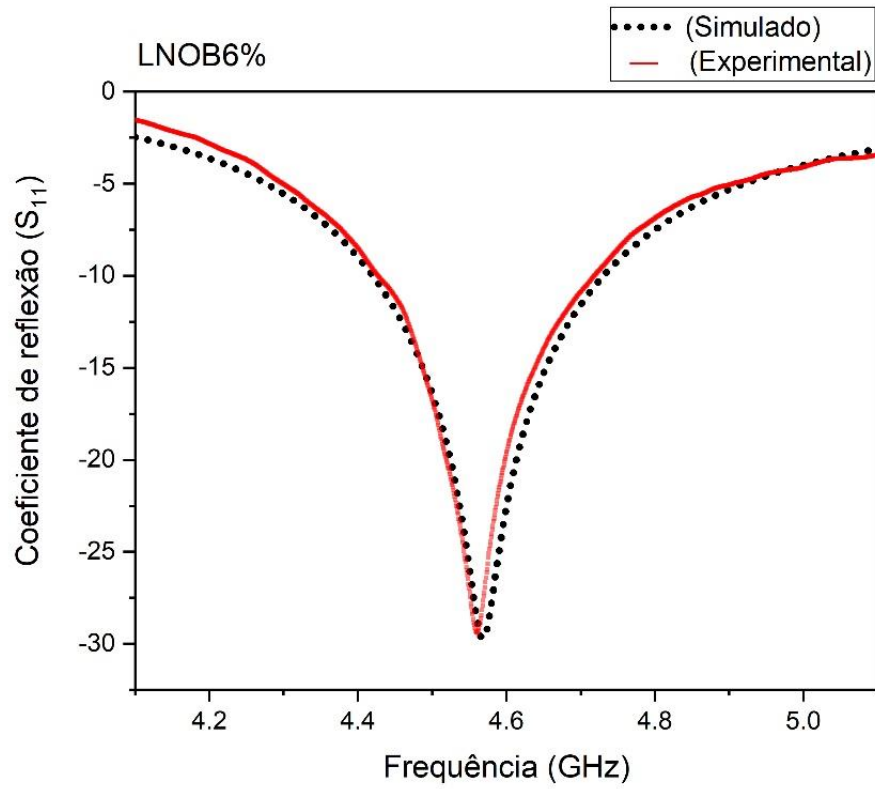
b) LNOB2%;



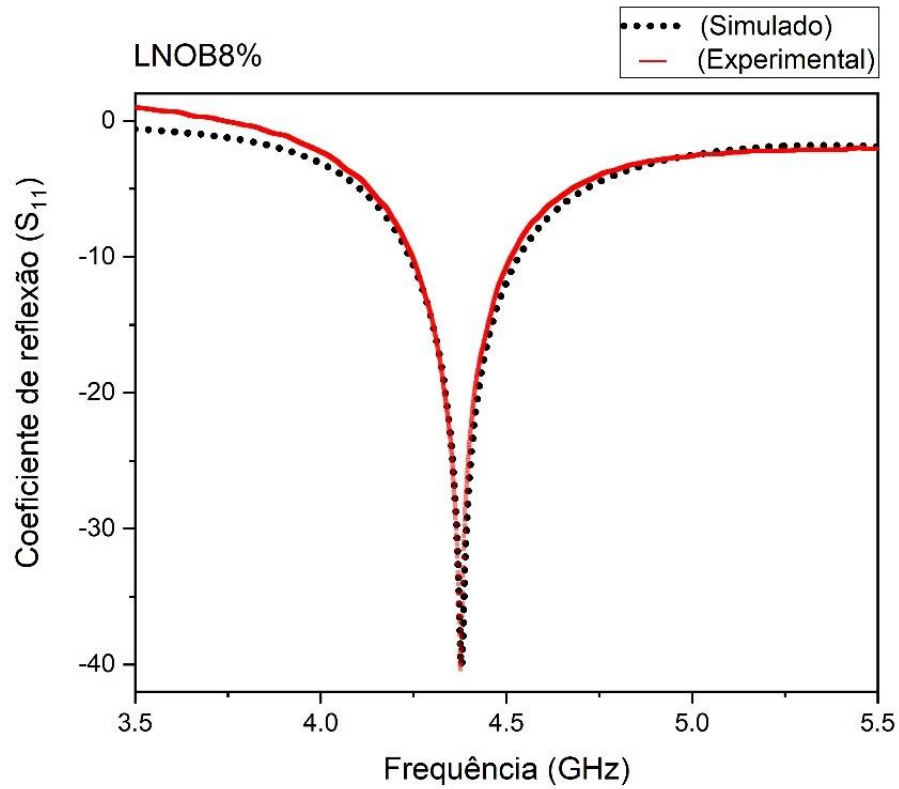
c) LNOB4%;



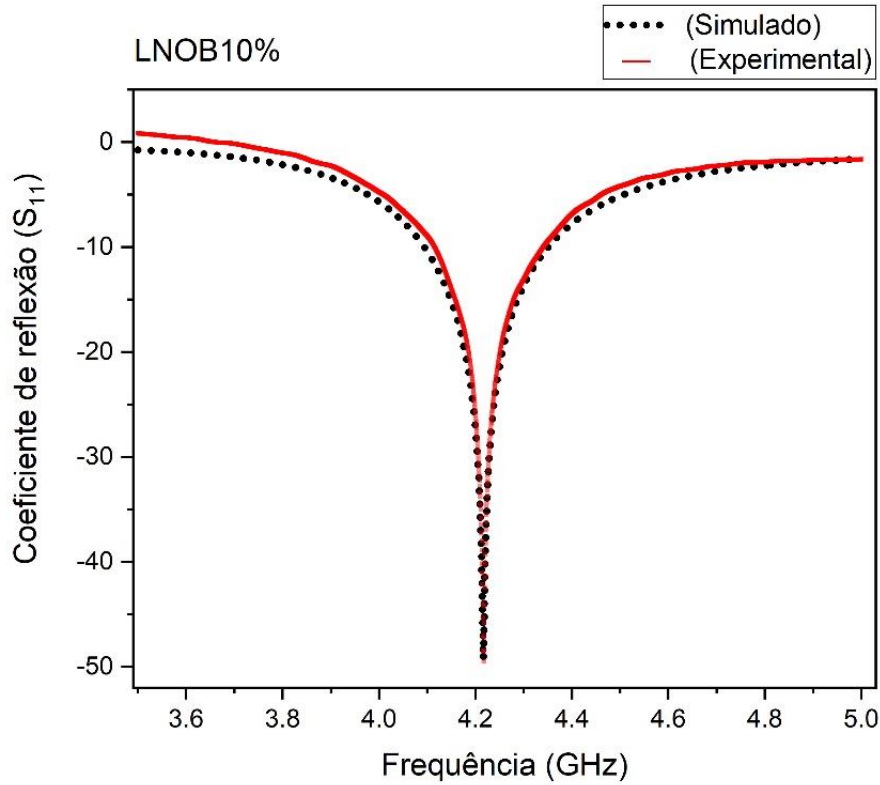
d) LNOB6%;



e) LNOB8%;



f) LNOB10%.



Fonte: Dados experimentais e simulados do autor (2025).

A partir dos resultados do coeficiente de reflexão (S_{11}) apresentados nas Figura 27 (a-f), as frequências de ressonância (f_r) obtidas experimentalmente e por simulação foram comparadas. As diferenças observadas entre os valores simulados e medidos foram quantificadas por meio do erro percentual relativo, calculado conforme a Equação (21).

Essa análise permitiu avaliar a precisão do modelo numérico em reproduzir o comportamento ressonante das amostras.

$$e = \frac{|V_{exp} - V_{sim}|}{V_{exp}} \times 100\% \quad (21)$$

Onde, e é o erro percentual, V_{exp} é o valor medido experimentalmente e V_{sim} é o valor obtido através da simulação numérica.

Os valores de erro calculados são apresentados na Tabela 8, onde se observa que, para todas as amostras, os erros de frequência permaneceram inferiores a 0,2%, enquanto os erros de S_{11} permaneceram abaixo de 1,5% na maioria das amostras. Esses desvios encontram-se dentro da faixa aceitável para simulações numéricas, indicando que o modelo implementado no

HFSS® reproduziu com precisão o comportamento dos materiais como antenas ressoadoras dielétricas.

Tabela 8 — Resultados experimentais e simulados de frequência de ressonância (f_r) e coeficiente de reflexão (S_{11}).

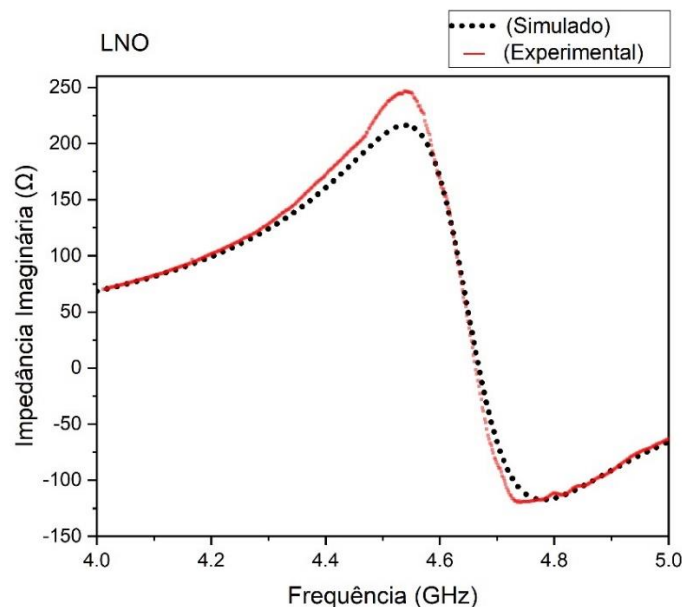
Amostra	f_r Exp. (GHz)	f_r Sim. (GHz)	Error (%)	S_{11} Exp. (dB)	S_{11} Sim. (dB)	Error (%)
LNO	5,45	5,46	-0,12	-31,62	-31,69	-0,23
LNOB2	4,78	4,78	-0,05	-28,82	-29,21	-1,35
LNOB4	4,76	4,76	-0,05	-38,17	-38,04	0,33
LNOB6	4,56	4,56	-0,15	-29,41	-29,75	-1,15
LNOB8	4,37	4,38	-0,07	-40,33	-40,11	0,55
LNOB10	4,21	4,21	0,02	-49,48	-49,29	0,37

Fonte: Dados experimentais e simulados do autor (2025).

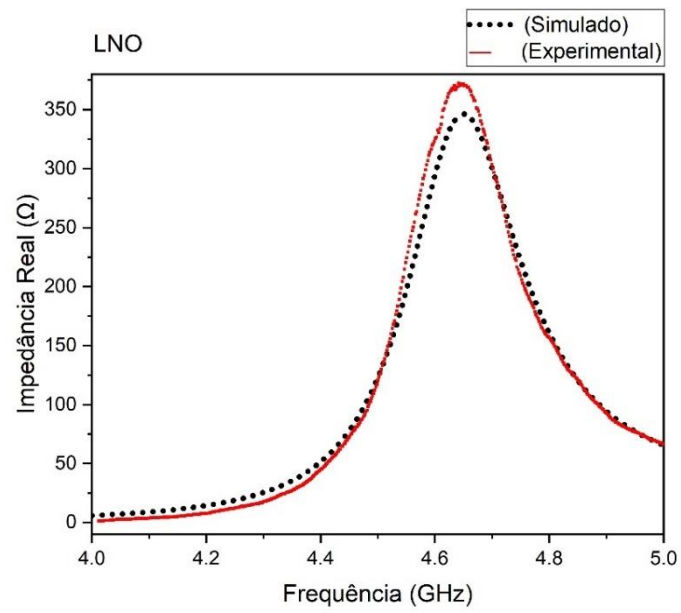
A Figura 27 a-l, mostra as curvas das impedâncias real (Z') e imaginária (Z''), experimental e simulada para LNO a LNOB10. Analisando os gráficos é possível verificar uma grande similaridade entre os resultados experimental e simulado para as impedâncias, demonstrando que a simulação realizada é adequada.

Figura 27 — Curvas de impedâncias real (Z') e imaginária (Z'') simuladas e experimentais, para as amostras cerâmicas LNO, e as adicionadas com Bi_2O_3 .

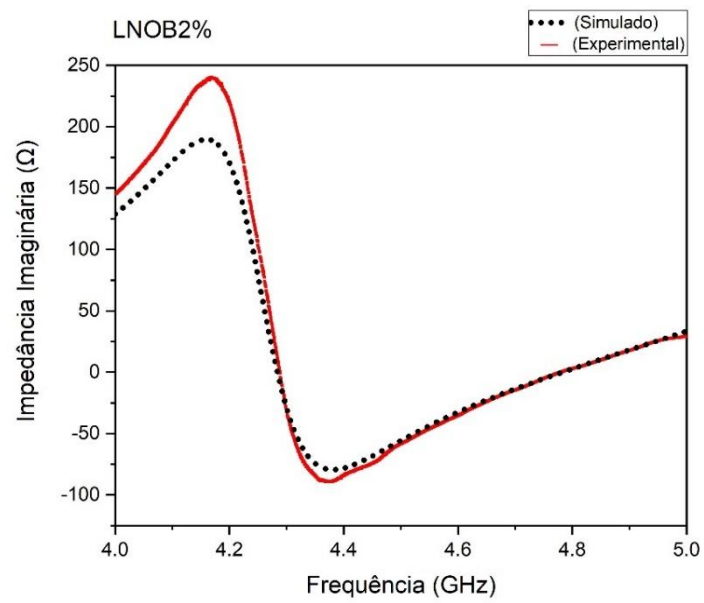
a) LNO (Z'');



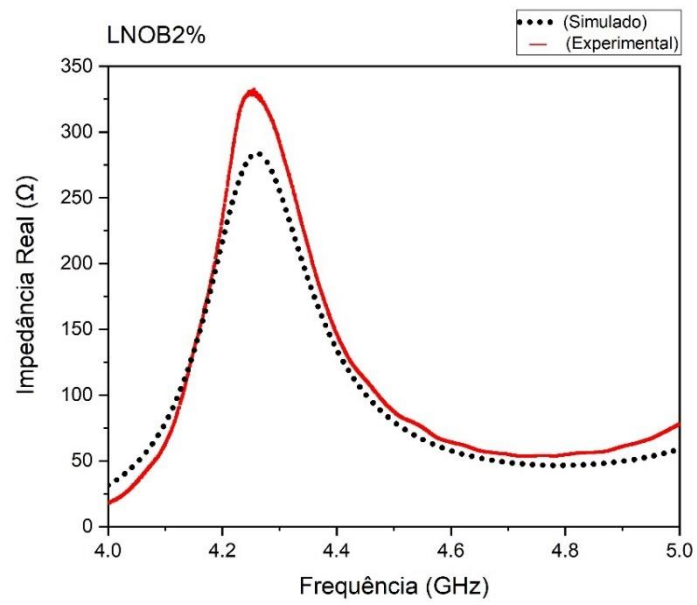
b) LNO (Z');



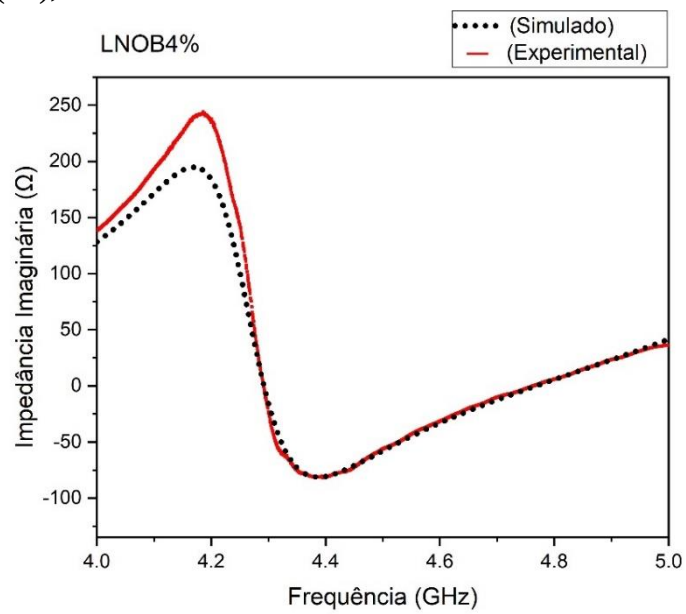
c) LNOB2% (Z'');



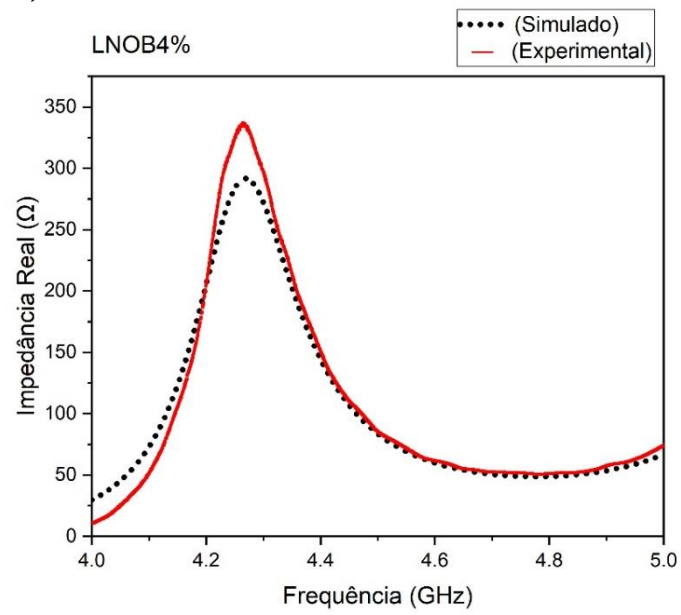
d) LNOB2% (Z');



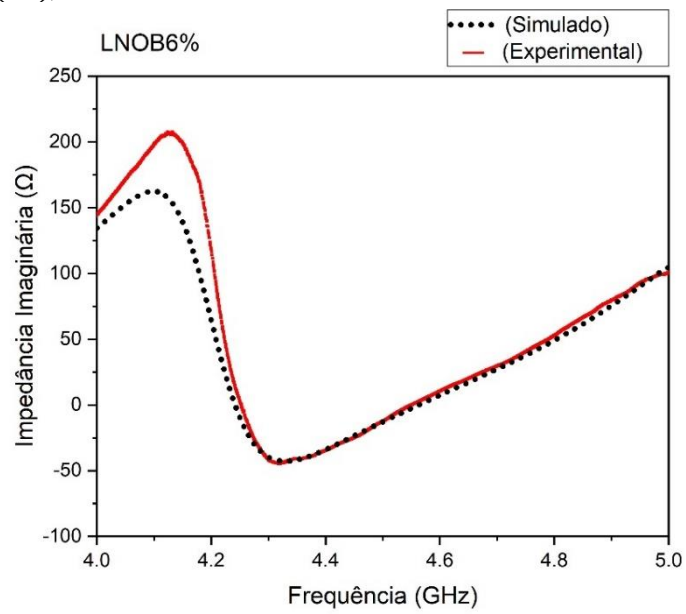
e) LNOB4% (Z'');



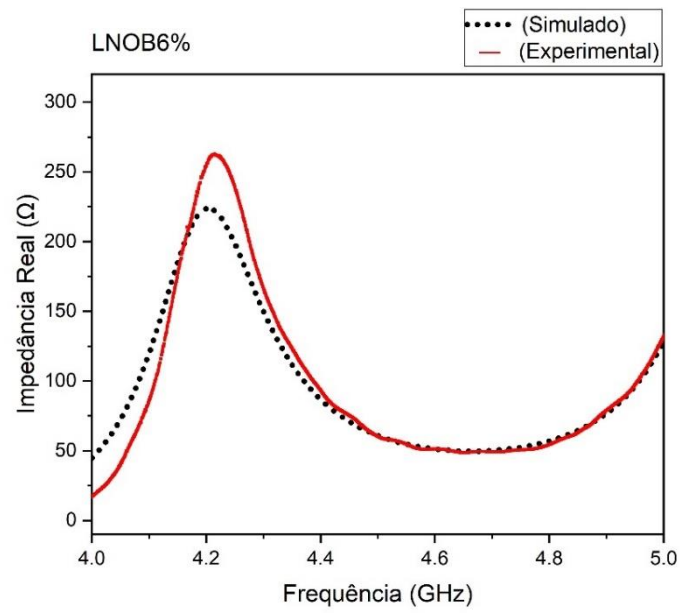
f) LNOB4% (Z');



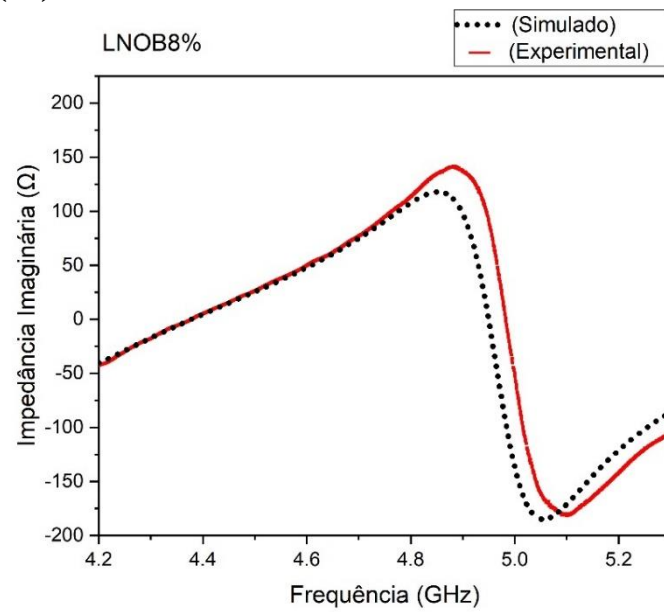
g) LNOB6% (Z'');



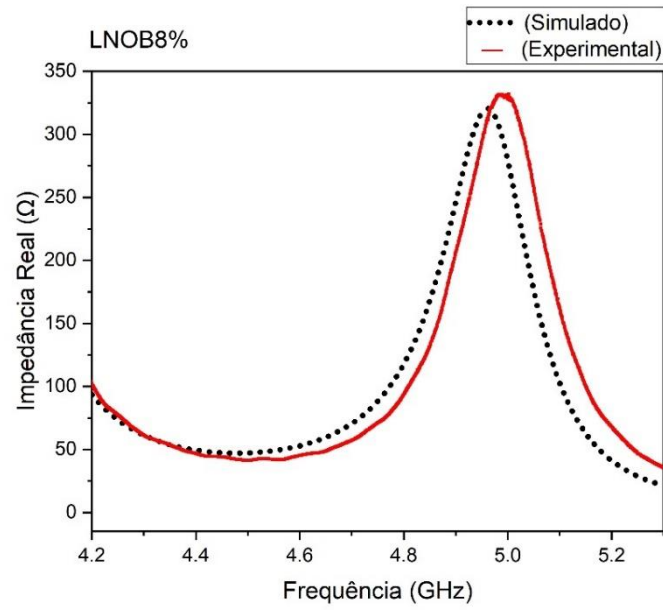
h) LNOB6% (Z');



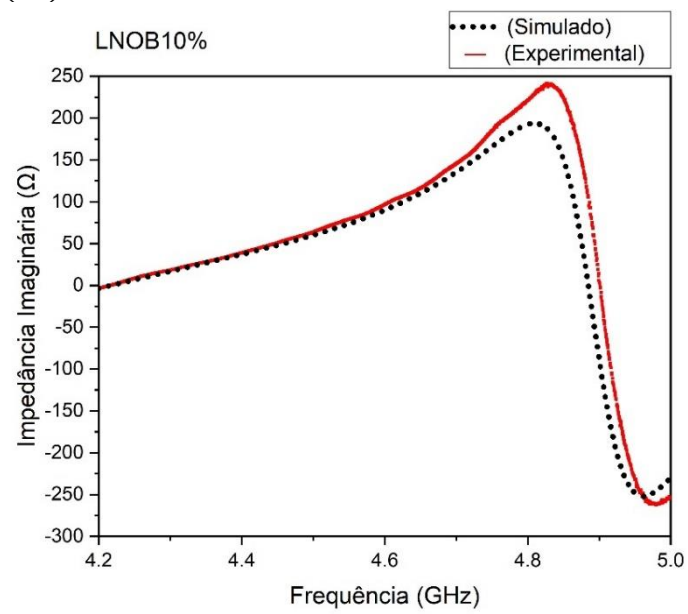
i) LNOB8% (Z'');



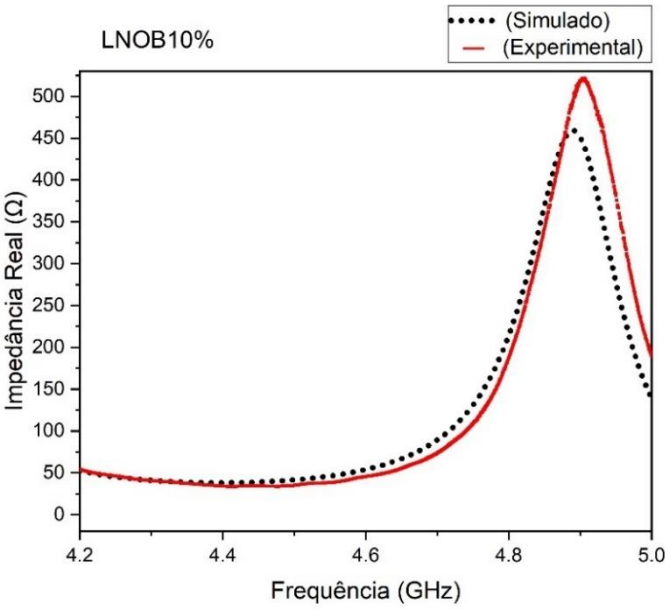
j) LNOB8% (Z');



k) LNOB10% (Z'').



l) LNOB10%(Z').



Fonte: Dados experimentais e simulados do autor (2025).

Após finalizado o processo de simulação numérica foi possível obter os valores dos parâmetros de campo distante ganho, diretividade e eficiência de radiação. Esses resultados são apresentados na Tabela 9, onde possível observar que os valores de directividade dos materiais ficaram entre 4,91 e 5,57 dBi, ganho apresentou valores entre 4,88 e 5,57 dBi, enquanto que a eficiência foi acima de 95%. Esses resultados obtidos demonstram que os compósitos $\text{LaNbO}_4 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ são materiais promissores para serem utilizados como antenas operando na faixa de micro-ondas, com potencial aplicação em dispositivos de comunicação.

Esses valores indicam que o compósito $\text{LaNbO}_4\text{-Bi}_2\text{O}_3$ apresentam potencial aplicação como elemento ativo em antenas ressoadoras dielétricas operando na banda C de micro-ondas, especialmente para aplicações de comunicação via satélite e redes sem fio de alta frequência.

Tabela 9 — Parâmetros simulados de diretividade, ganho e eficiência das antenas DRA baseadas em amostras cerâmicas de LaNbO_4 adicionadas com diferentes teores de Bi_2O_3 .

Amostra	D (mm)	H (mm)	Directividade (dBi)	Ganho (dBi)	Eficiência (%)
LNO	14,50	8,28	5,57	5,38	95,76
LNOB2	15,84	8,86	5,63	5,57	98,19
LNOB4	15,74	8,70	5,10	5,02	98,60
LNOB6	15,66	8,45	4,91	4,88	99,28
LNOB8	15,66	8,81	5,04	4,87	96,28
LNOB10	15,54	8,91	5,15	5,12	99,28

Fonte: Dados experimentais do autor (2025).

6.6 Síntese comparativa com a literatura

De modo geral, os resultados obtidos neste trabalho confirmam a efetividade da adição de Bi₂O₃ em promover redução da temperatura de sinterização do LaNbO₄, mantendo propriedades dielétricas compatíveis com aquelas reportadas na literatura para sistemas processados em temperaturas superiores.

A adição controlada de Bi₂O₃ favoreceu a densificação e reduziu as perdas dielétricas, ainda que os valores de τ_f tenham permanecido fora da faixa ideal (−10 a +10 ppm/°C). Mesmo assim, as composições estudadas apresentaram estabilidade estrutural e desempenho eletromagnético satisfatórios, validando o potencial da matriz LaNbO₄–Bi₂O₃ para aplicações em dispositivos de comunicação e antenas dielétricas.

Tabela 10 — Comparação das propriedades dielétricas (ϵ_r , tg δ e τ_f) das amostras de LaNbO₄ puro e adicionadas com Bi₂O₃, obtidas neste trabalho.

Material / Condições	ϵ_r	tg δ ($\times 10^{-3}$)	Q×f (GHz)	τ_f (ppm/°C)	Temp. Sinterização	Referência
LaNbO ₄ (literatura)	19–20	0,27	>50.000	+7 a +9	1.250–1.275 °C	Sebastian & Jantarpedi (2008); Xiao et al. (2020)
LaNbO ₄ + NiO (literatura))	20,58	~0,105	95.050	+17,93	1.075 °C	Deng et al. (2021)
LaNbO ₄ + CoO (literatura)	19,74	~0,161	62.100	+14,92	1000 °C	Deng et al. (2021)
LNO	10,37	2,535	3.091,91	9	1.200 °C / 4 h	Este trabalho
LNOB2	10,63	1,383	5.428,54	12,98	1.100 °C / 2 h	Este trabalho
LNOB4	11,3	0,8701	8.527,55	20,82	1.100 °C / 2 h	Este trabalho
LNOB6	12,91	3,968	1.784,99	16,13	1.100 °C / 2 h	Este trabalho
LNOB8	13,5	3,801	1.780,53	24,01	1.100 °C / 2 h	Este trabalho
LNOB10	14,78	5,765	1.119,44	21,38	1.100 °C / 2 h	Este trabalho

Fonte: Dados experimentais do autor (2025).

A Tabela 10 apresenta uma síntese comparativa entre as propriedades dielétricas obtidas neste estudo e aquelas reportadas em sistemas análogos da literatura. Os resultados mostram que, embora o LaNbO₄ puro sinterizado a 1200 °C apresente valores inferiores aos observados

em composições de referência, a adição de Bi_2O_3 resultou em melhorias progressivas de ϵ_r e $Q \times f$, confirmando a eficiência do aditivo como sinterizante por fase líquida. Os valores de $\tan \delta$ observados nas amostras LNOB2 e LNOB4 se situam em níveis comparáveis aos relatados para sistemas dopados com NiO e CoO (DENG et al., 2021), reforçando a competitividade do sistema estudado sob condições de processamento mais brandas.

Em síntese, o sistema $\text{LaNbO}_4\text{--Bi}_2\text{O}_3$ mostrou-se promissor para aplicações em micro-ondas e antenas dielétricas, conciliando baixa temperatura de sinterização, boas propriedades dielétricas e eficiência eletromagnética acima de 95%.

Esses resultados posicionam o compósito desenvolvido entre as melhores alternativas de materiais cerâmicos de médio desempenho, com potencial para otimizações futuras por meio de dopagens compensadoras voltadas ao ajuste de τ_f e aperfeiçoamento do fator $Q \times f$.

7 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi realizada a síntese da matriz cerâmica LaNbO_4 (LNO) e de seus compósitos com Bi_2O_3 para avaliar as propriedades dielétricas na faixa de micro-ondas, bem como o potencial de aplicação como antenas ressoadoras dielétricas (DRAs).

A adição de Bi_2O_3 teve como objetivo reduzir a temperatura de sinterização do LaNbO_4 mantendo propriedades dielétricas compatíveis, ainda que promovendo variações em ϵ_r , $\tan \delta$ e τ_f . Esse objetivo foi alcançado parcialmente: enquanto o LNO puro necessitou de sinterização a 1200 °C por 4 h, os compósitos contendo Bi_2O_3 puderam ser consolidados a 1100 °C por apenas 2 h, apresentando densificação intermediária (~70%) e preservação das propriedades dielétricas. Embora esse nível de densificação não represente a condição ideal para aplicações de alta performance, ele confirma a eficácia do Bi_2O_3 como agente fundente e a viabilidade de processamento em temperaturas reduzidas, possibilitando otimizações microestruturais futuras.

A análise por Difração de Raios X (DRX) confirmou a formação da fase monoclinica LaNbO_4 , em todas as composições, sem indícios de reação entre a matriz LNO e o óxido de bismuto (Bi_2O_3) adicionado.

No que se refere às propriedades dielétricas, a permissividade relativa (ϵ_r) apresentou incremento gradual com a adição de Bi_2O_3 , alcançando 14,79 na composição LNOB10, em comparação com 10,38 do LaNbO_4 puro.

A tangente de perdas dielétricas ($\tan \delta$) manteve-se na ordem de 10^{-3} , com destaque para a amostra LNOB2, que apresentou o menor valor ($8,70 \times 10^{-4}$). O coeficiente térmico da frequência de ressonância (τ_f) exibiu valores positivos, variando entre +9,0 e +24,0 ppm/°C, indicando que a adição de Bi_2O_3 não promoveu inversões de sinal nem alterações estruturais significativas. Esse comportamento confirma que o Bi_2O_3 atuou predominantemente como agente fundente, mantendo estabilidade térmica adequada para aplicações em micro-ondas.

As simulações numéricas realizadas no software HFSS mostraram excelente concordância com os resultados experimentais, tanto para o coeficiente de reflexão (S_{11}) quanto para as componentes de impedância. Os parâmetros de campo distante confirmaram desempenho promissor, com diretividade entre 4,91 e 5,57 dBi, ganho entre 4,88 e 5,57 dBi e eficiência superior a 95%.

Dessa forma, os resultados obtidos validam o sistema $\text{LaNbO}_4\text{-Bi}_2\text{O}_3$ como material cerâmico promissor para antenas compactas operando na faixa de micro-ondas, conciliando redução da temperatura de sinterização, boas propriedades dielétricas e comportamento eletromagnético estável.

8 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados deste estudo, recomenda-se que pesquisas futuras se concentrem em:

- Realizar o refinamento estrutural (Rietveld) dos compósitos $\text{LaNbO}_4\text{--Bi}_2\text{O}_3$, de modo a correlacionar parâmetros de rede com desempenho dielétrico;
- Aprimorar a densificação, explorando variações de tempo, rampa e atmosfera de sinterização, visando reduzir a porosidade residual;
- Investigar coaditivos ou dopantes alternativos que promovam melhor adensamento sem comprometer a estabilidade de fase;
- Otimizar o processamento por rotas alternativas, como prensagem isostática ou sinterização assistida por micro-ondas, para alcançar densificações superiores;
- Ampliar os estudos de simulação eletromagnética, integrando dados microestruturais refinados para o projeto de antenas DRA com maior precisão.

Essas ações permitirão aperfeiçoar a microestrutura e otimizar as propriedades térmicas e dielétricas do sistema $\text{LaNbO}_4\text{--Bi}_2\text{O}_3$, consolidando seu potencial para aplicações em dispositivos de comunicação de alto desempenho.

9 REFERÊNCIAS

ABREU, R. F. et al. Evaluation of dielectric properties of the barium titanium silicate ($\text{Ba}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8$) for microwave applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 32, n. 6, p. 7034–7048, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05414-7>.

ABREU, R. F. et al. Evaluation of the $\text{Sr}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8$ ceramic matrix for radiofrequency and microwave applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 34, n. 5, p. 457, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-023-09925-3>.

ABREU, T. O. et al. A novel ceramic matrix composite based on $\text{YNbO}_4\text{--TiO}_2$ for microwave applications. *Ceramics International*, v. 47, n. 11, p. 15424–15432, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.289>.

ALVES, Jorge Menezes; AZEVEDO, Lwzardy Antônio Freitas de; CASTRO, Lenardo José Saraiva de; NOGUEIRA, Francisco Enilton Alves; SALES, Juscelino Chaves; CARMO, Felipe Felix do; SILVA, Marcelo Antônio Santos da; NASCIMENTO, João Paulo Costa do; ALEXANDRIA, Auzuir Ripardo de; GOUVEIA, Daniel Xavier; SOMBRA, Antônio Sérgio Bezerra. Análise das propriedades dielétricas do compósito $\text{LaNbO}_4\text{--Bi}_2\text{O}_3$. In: XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2024), Belém, PA, 1–4 out. 2024. *Anais...* Belém: SBrT, 2024.

ARAÚJO, E. V. de et al. Effect of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3$ as a sintering aid in microstructure and dielectric properties of $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ electroceramic. *Applied Physics A*, v. 128, n. 5, p. 439, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-022-05580-3>.

BALANIS, C. A. *Antenna theory: analysis and design*. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

BARSOUM, M. *Fundamentals of ceramics*. Bristol: IOP Publishing Ltd., 2003.

BESSA, V. L. et al. Enhancing the electrical properties of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BiT) matrix by special alloying and sintering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 31, n. 24, p. 22265–22273, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04727-3>.

BIRADAR, S. et al. Synergistic optimization of physical, thermal, structural, mechanical, optical and radiation shielding characteristics in borate glasses doped with Bi_2O_3 . *Optical*

Materials, v. 155, p. 115815, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.115815>.

BIRADAR, S. et al. Influence of Bi_2O_3 addition on optical and mechanical properties of borate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 612, p. 122297, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122297>

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

CARMO, Felipe Felix do; NASCIMENTO, João Paulo Costa do; MORAIS, José Elder Viana de; MARTINS, Vinícius Cruz; SALES, Juscelino Chaves; SILVA, Marcelo Antônio dos Santos; SILVA, Rafael Santos; SOMBRA, Antônio Sérgio Bezerra. High thermal stability of the $\text{YNbO}_4\text{--CaYTiNbO}_7$ composites for radio frequency and microwave applications. *Materials Chemistry and Physics*, [S. l.], v. 271, p. 124956, 2021. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2021.124956..

CARMO, F. F. do et al. Strong NIR thermal enhancement in $\text{LaNbO}_4\text{:Er}^{3+}$ single crystal fibers: an ultrasensitive upconversion optical thermometer. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 1028, p. 180713, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180713>.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. Elements of X-ray diffraction. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

DENG, J. Y. et al. Optimization of sintering behavior and microwave dielectric properties of LaNbO_4 ceramics with NiO/CoO additive. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 859, p. 158378, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158378>.

DUAN, Xiaoxu; WU, Shuangfeng; HAO, Jiazheng; HE, Lunhua; LOU, Chenjie; TANG, Mingxue; DENG, Xia; LV, Jiasheng; FANG, Jing; LIU, Laijun; XU, Jungu. High oxygen vacancy concentration and improved electrical conductivity in tetragonal LaNbO_4 stabilized by Ga and Mo co-doping on the Nb site. *Acta Materialia*, [S. l.], v. 280, p. 120345, 2024. DOI: 10.1016/j.actamat.2024.120345..

FEI, L. et al. Advances in microwave dielectric ceramics for 5G and IoT applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 32, p. 12034–12058, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05864-1>.

GUAN, Z. et al. Up-conversion luminescence properties and temperature sensing behavior of $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ triply doped LaNbO_4 phosphors under 808 nm and 980 nm excitations. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 190, p. 109786, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109786>.

GUO, D. et al. Phase evolution, crystal structure, and microwave dielectric properties of water-insoluble $(1-x)\text{LaNbO}_4 - x\text{LaVO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.9$) ceramics. *Inorganic Chemistry*, v. 56, n. 15, p. 9321–9329, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b01462>.

HAN, X. et al. Structural transitions and dielectric behavior of LaNbO_4 ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 44, n. 1, p. 12–20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.09.012>.

KAO, T. et al. Wideband dielectric resonator antennas using novel ceramic materials. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 68, n. 10, p. 6895–6905, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2987810>.

KANG, S. J. L. Sintering: densification, grain growth and microstructure. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2005.

KWON, Y. J.; LEE, S. Excitation techniques for cylindrical dielectric resonator antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 52, n. 5, p. 68–75, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/MAP.2010.5687516>

LI, X. et al. Bright green up-conversion luminescence of $\text{LaNbO}_4:\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ phosphors under 808 nm and 980 nm excitations and the effects of dopant concentration. *Journal of Luminescence*, v. 241, p. 118524, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118524>.

LIU, X. et al. Near-infrared manipulation of multiple neuronal populations via trichromatic upconversion. *Nature Communications*, v. 12, n. 1, p. 1–11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25993-7>.

MANE, V. et al. A review on Bi_2O_3 nanomaterial for photocatalytic and antibacterial applications. *Chemical Physics Impact*, v. 3, p. 100059, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2021.100059>

MANE, R. S. et al. Bismuth oxide (Bi_2O_3) nanomaterials: synthesis, properties and applications.

Journal of Materials Science: Materials in Electronics, v. 35, p. 11245–11267, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-024-16354-7>.

MATHER, G. C.; FISHER, J.; ISLAM, M. S. Synthesis, crystal structure and ionic conductivity of LaNbO_4 . *Journal of Materials Chemistry*, v. 20, n. 50, p. 10688–10697, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1039/c0jm02254c>.

MENDES, L. et al. Effect of Pr_6O_{11} addition on the structural and dielectric properties of LaNbO_4 ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 947, p. 169636, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169636>.

NASCIMENTO, J. P. C. do et al. Visible and near-infrared luminescent properties of $\text{Pr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped lanthanum ortho-niobate phosphors. *Optical Materials*, v. 97, p. 109399, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109399>.

NOBREGA, F. A. C. et al. Influence of the addition of CaTiO_3 on the microwave dielectric properties of the BaMoO_4 matrix. *Materials Chemistry and Physics*, v. 289, p. 126478, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126478>.

NOGUEIRA, F. E. A. et al. Evaluation of the dielectric properties of $\text{CaMoO}_4\text{--TiO}_2$ composites for microwave applications under temperature variation. *Journal of Electronic Materials*, v. 52, n. 4, p. 2843–2851, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-023-10248-6>.

NOGUEIRA, F. E. A. et al. Elevated thermal stability of the dielectric properties of $\text{CaMoO}_4\text{--TiO}_2$ composites under temperature variations. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 35, n. 21, p. 1470, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-024-13227-7>.

PAVANI, K. et al. Analogy of different optical temperature sensing techniques in $\text{LaNbO}_4\text{:Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ phosphor. *Journal of Luminescence*, v. 235, p. 117992, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.117992>.

PECHARSKY, V. K.; ZAVALIJ, P. Y. *Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials*. New York: Springer, 2005.

POZAR, D. M. *Microwave engineering*. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2012.

RAHAMAN, M. N. *Ceramic processing*. Boca Raton: CRC Press, 2017.

SEBASTIAN, M. T.; SILVA, M. A. S.; SOMBRA, A. S. B. Microwave materials and applications. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.

SEBASTIAN, M. T. Dielectric materials for wireless communication. Amsterdam: Elsevier, 2008.

SEBASTIAN, M. T.; SILVA, M. A. S.; SOMBRA, A. S. B. Measurement of microwave dielectric properties and factors affecting them. In: SEBASTIAN, M. T.; SILVA, M. A. S.; SOMBRA, A. S. B. *Microwave materials and applications*. Chichester: John Wiley & Sons, 2017. p. 1–51.

SETOUH, T. et al. Design and performance of broadband DRAs for millimeter-wave applications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, v. 8, n. 4, p. 270–277, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-map.2013.0374>.

SWAMI, R. et al. Effects of Bi_2O_3 as sintering aid on the microstructure and electrical properties of $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ceramics. *Applied Physics A*, v. 131, n. 4, p. 296, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-025-09296-7>.

WU, J. et al. Structure, phase transition, and microwave dielectric properties of LaNbO_4 ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 92, n. 3, p. 671–675, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02903.x>.

XIAO, M. et al. Low temperature sintering behavior and microwave dielectric properties of LaNbO_4 ceramics with $\text{BaCu}(\text{B}_2\text{O}_5)$ additive. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 730, p. 528–532, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.009>.

XIAO, M. et al. Combined synthesis methods for producing LaNbO_4 ceramics and investigation of microwave dielectric properties based on complex chemical bond theory. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 812, p. 152154, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152154>.

YOUNG, R. A. (ed.). *The Rietveld method*. Oxford: Oxford University Press, 1993.

ZANG, Moyan; LI, Lin; XUE, Jing; ZHANG, Jing; ZHOU, Jun; ZHANG, Lin; DONG, Zhi. Low-temperature sintering behavior and microwave dielectric properties of CaMoO_4 ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, [S. l.], v. 44, n. 2, p. 747–754, 2024. DOI: [10.1016/j.jeurceramsoc.2023.09.029](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.09.029).

ZHANG, Y. et al. TiO₂-modified LaNbO₄ ceramics: microstructure and dielectric properties. *Ceramics International*, v. 48, n. 12, p. 17426–17435, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.081>.

ZHU, H. et al. Effect of Ca substitution on the microwave properties and the inhibition of Ag diffusion in Ba_{1-x}Ca_xMoO₄ ceramics. *Ceramics International*, v. 46, n. 10, p. 16119–16125, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.147>.

ZHU, J. et al. Development trends and perspectives of future sensors and MEMS/NEMS. *Micromachines*, v. 11, n. 7, p. 1–22, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi11070658>.