



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA**

**DIEGO DA MOTA COLARES**

**A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  NAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS EM  
MICRO-ONDAS DA MATRIZ  $\text{BiCuTi}_3\text{FeO}_{12}$  (BCTFO)**

**FORTALEZA**

**2020**

DIEGO DA MOTA COLARES

A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  NAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS EM  
MICRO-ONDAS DA MATRIZ  $\text{BiCuTi}_3\text{FeO}_{12}$  (BCTFO)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Teleinformática Área de concentração: Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Sérgio Bezerra Sombra.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- C649i Colares, Diego da Mota.  
A influência da adição de Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nas propriedades dielétricas em micro-ondas da matriz  
BiCuTi<sub>3</sub>FeO<sub>12</sub> (BCTFO) / Diego da Mota Colares. – 2020.  
49 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2020.  
Orientação: Prof. Dr. Antônio Sérgio Bezerra Sombra.
1. Antenas. 2. Micro-ondas. 3. Compósitos. 4. Cerâmicas. I. Título.

CDD 621.38

---

DIEGO DA MOTA COLARES

A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  NAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS EM  
MICRO-ONDAS DA MATRIZ  $\text{BiCuTi}_3\text{FeO}_{12}$  (BCTFO)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de concentração: Eletromagnetismo Aplicado.

Aprovada em: 07/07/2020.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Antônio Sérgio Bezerra Sombra (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Kléber Zuza Nóbrega  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dr. Juscelino Chaves Sales  
Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

Aos Deuses.

Aos meus pais, Maria da Conceição da Mota e  
Francisco Pereira Colares.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais pelo todo amor e dedicação que tiveram por mim.

Ao Dákila-Pesquisas pela a parceria em todos os aspectos.

Ao Prof. Dr. Antônio Sérgio Bezerra Sombra pela excelente orientação.

Aos meus amigos do LOCEM em especial ao Daniel Barros, Roterdan Fernandes, João Paulo, Manuel Henrique, Sebastião, Helenilson Júnior, Yguatyara Luna e Marcelo Silva.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Busquem conhecimento”

**Bilu**

## RESUMO

Nesta dissertação, foi analisado o comportamento da adição do óxido de bismuto ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) sobre a matriz cerâmica  $\text{BiCuTi}_3\text{FeO}_{12}$  (BCTFO) para aplicação em antenas ressoadoras dielétricas (DRAs) na faixa de micro-ondas. Para isso, foram produzidos compósitos com as adições de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  na matriz BCTFO cujos percentuais variaram de 0%, 20%, 60% e 80%. Afim de confirmar e estudar as estruturas cristalinas das fases de BCTFO e  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nas amostras, foram feitas difrações de Raios-X. Para caracterizar as propriedades dielétricas em micro-ondas desses compósitos, primeiramente, foi analisado em cada um dos compósitos o coeficiente de temperatura da frequência de ressonância ( $\tau_f$ ) por meio do método Silva-Fernandes-Sombra (SFS). Com isso, tais medidas indicaram uma estabilidade térmica com aumento da adição  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  sobre a matriz cerâmica BCTFO, pois o  $\tau_f$  variou de  $1683 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$  a  $129 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$ . Segundamente, foram feitas medidas de impedância na faixa de micro-ondas. Dessa forma, as medidas impedância indicaram que os compósitos anteriormente citados possuem frequências ressonantes de 2,42 GHz a 3,65 GHz. Além disso, as medidas de impedância também indicaram uma redução da permissividade relativa em relação ao aumento percentual de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nas amostras, porque a permissividade relativa variou de 71 a 21. As perdas de retorno também foram obtidas por meio das medidas de impedância em todas as amostras e essas apresentaram menores que -10 dB. Além das medidas experimentais, foram usadas simulações computacionais por meio do programa HFSS com objetivo de validar os dados obtidos experimentalmente e de obter parâmetros de antenas dos compósitos, como: diagrama de radiação, diretividade, ganho e eficiência. Assim, todos os compósitos analisados possuem bons parâmetros de antenas e podem ser aplicados como DRAs, pois as eficiências de todas DRAs fabricadas estão acima de 50%.

**Palavras-chave:** BCTFO, antenas, micro-ondas, compósito, DRA.



## ABSTRACT

In this dissertation, the behavior of the addition of bismuth oxide ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) on the  $\text{BiCuTi}_3\text{FeO}_{12}$  ceramic matrix (BCTFO) was analyzed for application in dielectric resonant antennas (DRAs) in the microwave range. For this, composites were produced with the addition of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  in the BCTFO matrix whose percentages varied from 0%, 20%, 60% and 80%. In order to confirm and study the crystalline structures of the BCTFO and  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  phases in the samples, X-ray diffractions were made. To characterize the microwave dielectric properties of these composites, first, the temperature coefficient of the resonance frequency ( $\tau_f$ ) was analyzed in each of the composites using the Silva-Fernandes-Sombra (SFS) method. As a result, such measures indicated thermal stability with increased  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  addition over the BCTFO ceramic matrix, as the  $\tau_f$  varied from  $1683 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$  to  $129 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$ . Secondly, impedance measurements were made in the microwave range. Thus, the impedance measures indicated that the composites previously mentioned have resonant frequencies from 2.42 GHz to 3.65 GHz. In addition, the impedance measures also indicated a reduction in the relative permittiveness in relation to the percentage increase of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  in the samples, because the relative permittivity varied from 71 to 21. Return losses were also obtained by means of impedance measurements in all samples and these showed less than -10 dB. In addition to the experimental measurements, computer simulations were used using the HFSS program in order to validate the data obtained experimentally and to obtain composite antenna parameters, such as: radiation diagram, directivity, gain and efficiency. Thus, all analyzed composites have good antenna parameters and can be applied as DRAs, since the efficiencies of all manufactured DRAs are above 50%.

**Keywords:** BCTFO, antennas, microwave, composite, DRA.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Representação da célula unitária do BCTO.....	17
Figura 2	– Padrão de radiação de uma antena .....	21
Figura 3	– DRAs de diversas geometrias .....	23
Figura 4	– Fluxograma do Procedimento Experimental .....	25
Figura 5	– Moinho Fritsch Pulverisette 5 .....	26
Figura 6	– Ferramentas de produção das peças .....	27
Figura 7	– Incidência de Raios-X nos planos cristalinos .....	25
Figura 8	– Dispositivo do método Silva-Fernandes-Sombra .....	27
Figura 9	– Equipamento de Monopolo .....	28
Figura 10	– Modelo computacional inspirado na técnica de Monopolo .....	29
Figura 11	– Peças produzidas .....	30
Figura 12	– Difratoograma da amostra BCTFO .....	31
Figura 13	– a) padrões de difração das amostras e b) ampliação dos difratogramas .....	32
Figura 14	– Gráfico $\tau_f$ versus % de adição de $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .....	33
Figura 15	– Gráfico $\epsilon_r$ versus % de adição de $\text{Bi}_2\text{O}_3$ nas amostras .....	34
Figura 16	– Gráfico $S_{11}$ versus frequência para amostra BCTFO .....	38
Figura 17	– Gráfico $S_{11}$ versus frequência para amostra BCTFO20Bi .....	39
Figura 18	– Gráfico $S_{11}$ versus frequência para amostra BCTFO60Bi .....	39
Figura 19	– Gráfico $S_{11}$ versus frequência para amostra BCTFO80Bi .....	40
Figura 20	– Gráfico $Z'$ e $Z''$ em função da frequência para amostra BCTFO.....	41
Figura 21	– Gráfico $Z'$ e $Z''$ em função da frequência para amostra BCTFO20Bi .....	41
Figura 22	– Gráfico $Z'$ e $Z''$ em função da frequência para amostra BCTFO60Bi .....	42
Figura 23	– Gráfico $Z'$ e $Z''$ em função da frequência para amostra BCTFO80Bi .....	42
Figura 24	– Diagrama de radiação para amostra BCTFO .....	44

Figura 25	– Diagrama de radiação para amostra BCTFO20Bi .....	44
Figura 26	– Diagrama de radiação para amostra BCTFO60Bi .....	44
Figura 27	– Diagrama de radiação para amostra BCTFO80Bi .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros geométricos das amostras .....	34
Tabela 2 – Valores do $\tau_f$ das DRAs .....	35
Tabela 3 – Propriedades dielétricas das DRAs .....	36
Tabela 4 – Parâmetros de entrada na simulação .....	38
Tabela 5 – Valores experimentais e simulados do $S_{11}$ .....	40
Tabela 6 – Valores experimentais e simulados de $Z'$ .....	43
Tabela 7 – Valores experimentais e simulados de $Z''$ .....	43
Tabela 8 – Parâmetros de antena .....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BCTFO	$\text{BiCu}_3\text{Ti}_3\text{FeO}_{12}$
DRA	<i>Dielectric Resonator Antenna</i>
G	<i>Goodness off it</i>
HE	Modo Híbrido Elétrico
PVA	Álcool polivinil
$R_{wp}$	Erro residual
TE	Modo Transversal Elétrico
TM	Modo Transversal Magnético

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta$	Perda dielétrica
$\tau_f$	Coeficiente de temperatura da frequência ressonante
$\epsilon_0$	Permissividade no ar
$\epsilon_r'$	Permissividade relativa real
$\epsilon_r''$	Permissividade relativa imaginária
U	Intensidade de Radiação
E	Campo elétrico
D	Diretividade
H	Campo Magnético
B	Densidade do campo magnético
J	Densidade de corrente elétrica
$\sigma$	Condutividade elétrica
$P_{ent}$	Potência de entrada
$P_{rad}$	Potência radiada
n	Ordem da difração
d	Espaçamento entre planos cristalinos
$\Theta$	Ângulo de Bragg
$J_n$	Coeficiente de Bessel
hkl	Espaçamento entre os planos
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa
$\mu$	Permeabilidade magnética no vácuo
e	eficiência
$W_{rad}$	Densidade de radiação
$Z'$	Impedância real
$Z''$	Impedância imaginária
$\rho$	Densidade de carga livre
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius

## SUMÁRIO

<b>1.0</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1</b>	<b>Matriz Cerâmica BCTFO</b> .....	17
<b>2.0</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	18
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	18
<b>3.0</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	19
<b>3.1</b>	<b>Eletromagnetismo Aplicado</b> .....	19
<b>3.2</b>	<b>Propriedades Eletromagnéticas dos Materiais</b> .....	20
<b>3.3</b>	<b>Parâmetros Fundamentais de Antenas</b> .....	21
<b>3.4</b>	<b>Antenas Ressonadoras Dielétricas</b> .....	23
<b>4.0</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	25
<b>4.1</b>	<b>Fabricação da Matriz Cerâmica BCTFO</b> .....	26
<b>4.2</b>	<b>Fabricação das Peças Cerâmicas</b> .....	27
<b>4.3</b>	<b>Difração de Raios-X</b> .....	28
<b>4.4</b>	<b>Coefficiente de Temperatura da Frequência Ressonante</b> .....	29
<b>4.5</b>	<b>Medidas de Monopolo</b> .....	30
<b>4.6</b>	<b>Simulação Computacional</b> .....	32
<b>5.0</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	33
<b>5.1</b>	<b>Amostras Cerâmicas Produzidas</b> .....	33
<b>5.2</b>	<b>Difração de Raios-X das DRAs</b> .....	34
<b>5.3</b>	<b>Coefficiente de Temperatura da Frequência Ressonante das DRAs</b> .....	35
<b>5.4</b>	<b>Medidas de Monopolo das DRAs</b> .....	36
<b>5.5</b>	<b>Simulação Computacional das DRAs</b> .....	37
<b>6.0</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	46
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	47
	<b>PRODUÇÃO CIENTÍFICA</b> .....	48

## 1.0 INTRODUÇÃO

Inicialmente, a palavra cerâmica é derivada de *keramos* que significa “barro ou cerâmica feita de barro cozido. As cerâmicas são formadas por elementos químicos que quando ligados formam compostos químicos que podem ser convenientemente sinterizados na faixa de temperatura 900 °C a 1200 °C. Além disso, os materiais cerâmicos são formados, muitas vezes, por diversos elementos. As ligações atômicas das cerâmicas podem diversificar de puramente iônica a totalmente covalente. Para os materiais cerâmicos cuja a ligação atômica é predominantemente iônica, as estruturas cristalinas podem ser consideradas como sendo compostas por íons carregados eletricamente em vez de átomos. (WILLIAM D. CALLISTER; DAVID G. RETHWISCH, 2015)

As eletro-cerâmicas têm sido usadas há muito tempo na área da eletrônica como dispositivos elétricos pode-se citar isoladores, condutores iônicos, capacitores, ressonadores, substratos e materiais magnéticos. Além disso, através de modificações por dopagem ou substituições adequadas de certos elementos pode resultar em novos materiais artificiais. Assim, é possível modificar as propriedades físicas e estruturais das eletro-cerâmicas objetivando determinados interesses técnico-científicos. Novos materiais artificiais são fabricados ao combinar pelo menos dois componentes de fases como cerâmica-cerâmica ou cerâmica-polímero de maneira ordenada ou distribuída aleatoriamente. (NEWNHAM, 1986)

As eletro-cerâmicas foram se destacando também em dispositivos utilizados em projetos de engenharia de telecomunicações, pois elas podem ser usadas como *Dielectric Resonator Antenna* (DRA) na faixa de micro-ondas em diversas vias de telecomunicações civis e militares (SEBASTIAN, 2008). As geometrias das DRAs podem ser diversas, mas as principais são semiesféricas, cilíndricas e retangulares. As vantagens para o formato cilíndrico são no que tange à flexibilidade de projeto, melhor controle na razão raio\altura e facilidade de obtenção dos modos excitados (PENTOSA, 2007). As DRAs funcionam na faixa de frequências de 300MHz-300GHz e elas produzem baixas perdas ôhmicas em altas frequências. Tendo-se em vista isso, cada vez mais se busca novas eletro-cerâmicas que possuem características dielétricas interessantes, como baixa tangente de perda e alta permissividade relativa.

A principal justificativa desta dissertação foi estudar a caracterização dielétrica da matriz cerâmica BCTFO pura e dopada com  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  na faixa dos micro-ondas. A matriz cerâmica BCTFO possui uma baixa temperatura de sinterização. Foi notado que não existe na literatura atual qualquer estudo científico dessa matriz pura ou dopada na área de micro-ondas. Foi usado a adição de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  para a confecção dos compósitos, pois é esperado que tal óxido possa

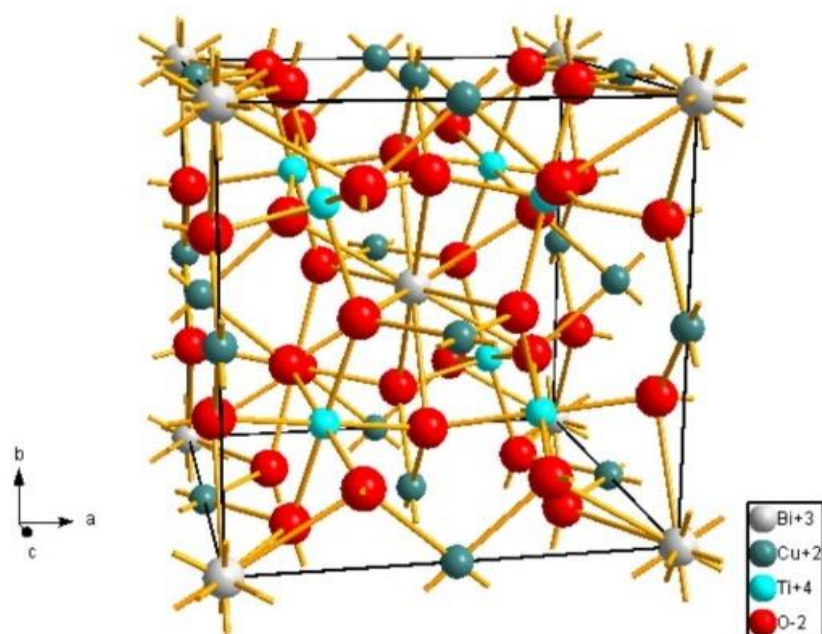


melhorar a estabilidade térmica com a frequência ressonante e otimizar os parâmetros de antena dos compósitos produzidos.

### 1.1 Matriz Cerâmica BCTFO

Sabe-se que a matriz cerâmica  $\text{BiCu}_3\text{Ti}_3\text{FeO}_{12}$  (BCTFO) é um tipo de composto iso-estrutural da família  $\text{ACu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ . Dentro dessa família, o composto mais semelhante ao BCTFO é o  $\text{Bi}_{2/3}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  (BCTO). A matriz cerâmica BCTFO não possui CIF (*Crystallographic Information Framework*), com isso, não é possível ter a representação da célula unitária dessa matriz cerâmica. A figura 1 ilustra a estrutura cristalina do  $\text{Bi}_{2/3}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ . A estrutura cristalográfica do BCTFO é cúbica relacionada à perovskita na qual o cátion de  $\text{Bi}^{3+}$  substitui os cátions de  $\text{Ca}^{2+}$  e o cátion de  $\text{Fe}^{3+}$  substitua o  $\text{Ti}^{4+}$ . A permissividade dielétrica relativa e a perda dielétrica da cerâmica do BCTFO foram relatadas como 692 e 0,082 a  $25^\circ\text{C}$  (a 100 kHz) (LIANG et al., 2018). Existem artigos científicos que discutem a caracterização dielétrica da matriz cerâmica BCTFO de  $10^2$  a  $10^6$  Hz, mas a caracterização dielétrica dessa matriz em micro-ondas ainda não explorada ou divulgada. (SHI et al., 2015)

Figura 1: Representação da célula unitária do BCTO



Fonte: Autoral

## 2.0 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desta dissertação foi estudar a caracterização dielétrica da matriz cerâmica BCTFO pura e dopada com  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  na faixa dos micro-ondas, procurando analisar a possibilidade de aplicação como DRA.

### 2.2 Objetivos Específicos

1. Produzir as amostras cerâmicas de BCTFO pura e dopadas com  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .
2. Identificar por meio de difração de Raios-x as fases das amostras cerâmicas de BCTFO pura e dopadas com  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .
3. Extrair os parâmetros dielétricos por meio de analisadores de impedância das amostras anteriormente citadas na faixa de micro-ondas, como coeficiente de temperatura da frequência de ressonância  $\tau_f$ , permissividade relativa, tangente de perda e frequência ressonante.
4. Simular e verificar a viabilidade das amostras cerâmicas produzidas como DRAs.

### 3.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Eletromagnetismo Aplicado

Para se compreender as propriedades elétricas e magnéticas dos materiais é necessário saber quais leis e equações regem tais propriedades. Sabe-se que o cientista Maxwell unificou as leis do eletromagnetismo em quatro equações que são:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (4)$$

Onde:  $\vec{H}$  é o vetor campo magnético;  $\vec{J}$  é o vetor densidade de corrente elétrica;  $\vec{D}$  é o vetor densidade do campo elétrico;  $\vec{E}$  é o vetor campo elétrico;  $\vec{B}$  é o vetor densidade do campo magnético;  $\rho$  é a densidade de carga livre.

A equação (1) é a lei de Ampère na qual mostra que a densidade total de corrente ( $\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ) provém do rotacional do campo magnético  $\vec{H}$ . Posteriormente, a equação (2) é a lei de Faraday cujo significado é que a taxa de variação negativa do fluxo magnético  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  vêm do rotacional do campo elétrico  $\vec{E}$ . Já a equação (3) é a lei de Gauss para o campo elétrico e ela diz que a fonte da densidade de carga livre é o divergente do campo elétrico  $\vec{E}$ . Agora, para a equação (4) também chamada de lei de Gauss para o magnetismo cuja interpretação física diz que não existe carga magnética, com isso, o campo magnético  $\vec{B}$  é sempre um campo rotacional com linhas de campo fechadas. (GUSTRAU, 2013)

### 3.2 Propriedades Eletromagnéticas dos Materiais

As propriedades dos campos elétricos e magnéticos estão ligadas com propriedades do material através das densidades de fluxos elétricos e magnéticos (GUSTRAU, 2012). Assim, pode-se chamar tais equações como relações constitutivas que são:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (7)$$

Onde:  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo;  $\mu_r$  é a permeabilidade relativa  $\varepsilon_0$  é a permissividade do vácuo;  $\varepsilon_r$  é a permissividade relativa;  $\sigma$  é a condutividade do material.

Também existe a relação de tangente de perda que é um parâmetro no qual mede o quanto de calor é dissipado pelo material ao ser submetido a uma corrente elétrica. Segundo (SEBASTIAN, 2008), ela está relacionada com as permissividades relativas reais e imaginárias da seguinte forma:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''_r}{\varepsilon'_r}, \quad (8)$$

Onde:  $\varepsilon'_r$  é a permissividade relativa real e  $\varepsilon''_r$  é a permissividade relativa imaginária.

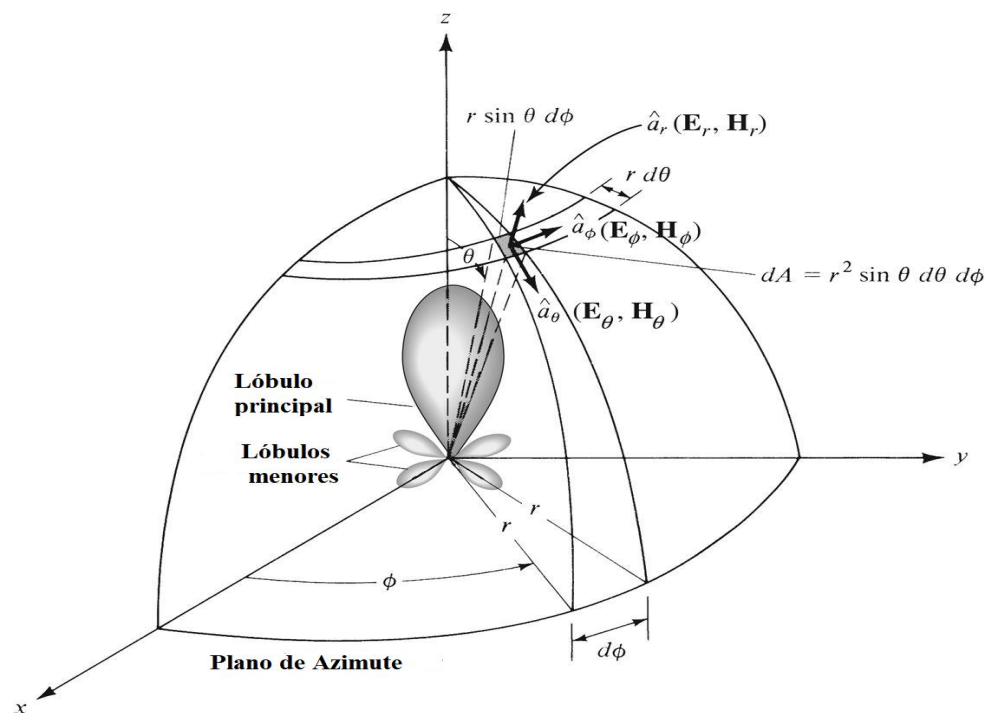
Quando um material é submetido a um campo elétrico, os dipolos de polarização do material interagem com o campo eletromagnético aplicado. Para materiais dielétricos independente da fase física que estejam, a interação do campo eletromagnético produz ao material a capacidade de armazenar energia elétrica, ou seja, eles são considerados capacitores (BALANIS, 2012).

### 3.3 Parâmetros Fundamentais de Antenas

Define-se antena como uma estrutura capaz de irradiar ou receber ondas de rádio. Existem diversos parâmetros de antenas nos quais servem para explicar o desempenho de tal dispositivo. Dentre desses parâmetros pode-se citar: padrão de radiação, diretividade, ganho e eficiência.

O padrão de radiação da antena é um parâmetro que é representado por uma função matemática que descreve as propriedades de radiação da antena em função das coordenadas espaciais. Muitas vezes, o padrão de radiação é determinado na região do campo distante (BALANIS, 2016). Uma representação do padrão de radiação é feita na figura 2.

Figura 2: Padrão de radiação de uma antena



Fonte: (BALANIS, 2016)

A intensidade da radiação de uma antena em uma determinada direção é definida como a potência irradiada por unidade de ângulo sólido. Ela é obtida pelo produto da densidade da radiação pelo quadrado da distância. Matematicamente:

$$U = r^2 W_{rad}, \quad (9)$$

Onde:  $U$  é a intensidade de radiação;  $W_{rad}$  é a densidade de radiação e  $r$  é a distância.

A potência radiada ( $P_{rad}$ ) é obtida integrando a intensidade da radiação sobre o ângulo sólido, logo:

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U d\Omega . \quad (10)$$

Um outro parâmetro importante é a diretividade. Ela é definida como a razão entre a intensidade da radiação em uma determinada direção da antena e a intensidade da radiação em todas as direções. A diretividade de uma fonte não isotrópica é igual a razão de sua intensidade de radiação em uma determinada direção sobre a de uma fonte isotrópica. Então:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} . \quad (11)$$

A máxima diretividade é dada como:

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} , \quad (12)$$

Onde:  $D$  é a diretividade;  $D_{max}$  é a diretividade máxima;  $U_0$  intensidade de radiação de uma fonte isotrópica;  $U_{max}$  é a intensidade máxima de radiação.

O ganho de uma antena é definido como a razão da intensidade, em uma determinada direção, com a potência de entrada pela antena irradiada isotropicamente. Matematicamente:

$$G = 4\pi \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{ent}} . \quad (13)$$

Onde:  $P_{ent}$  é a potência de entrada.

Pode-se relacionar a potência radiada com a eficiência da antena e com a potência de entrada ( $P_{ent}$ ) da seguinte forma:

$$P_{rad} = eP_{ent} , \quad (14)$$

Onde:  $e$  eficiência da antena.

Também se pode relacionar a eficiência da antena com o ganho e a diretividade:

$$G = eD . \quad (15)$$

Para o caso da máxima diretividade e ganho máximo:

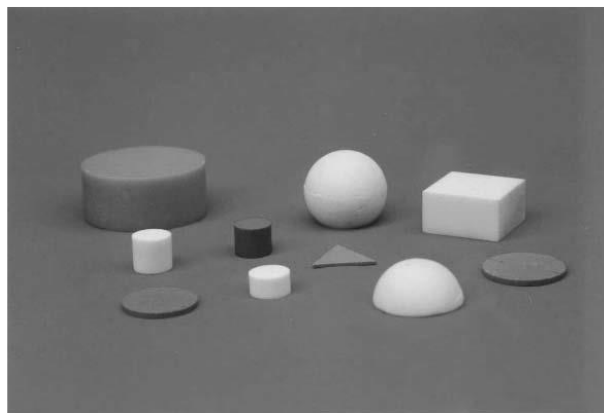
$$G_{max} = eD_{max} . \quad (16)$$

### 3.4 Antenas Ressonadoras Dielétricas

Historicamente, DRAs provêm de ressoadores dielétricos que operam na faixa de micro-ondas. Somente no final da década de 1960 que começaram as pesquisas sobre o uso de ressoadores dielétricos com baixa perda para diversas aplicações tecnológicas. Normalmente, os ressoadores dielétricos eram geralmente usados como capacitores e não como radiadores, ou seja, antenas.

Em 1983, foi observado que na faixa de 100-300 GHz a perda do condutor de antenas metálicas aumentou consideravelmente, mas para DRAs que operam nessa mesma faixa de frequência a perda é desprezada (LONG; MCALLISTER; SHEN, 1983). Vale afirmar que a variação de temperatura da frequência ressonante das DRAs em projetos de micro-ondas deve permanecer no intervalo de  $-10 \text{ ppm}^{\circ}\text{C}^{-1}$  à  $10 \text{ ppm}^{\circ}\text{C}^{-1}$  (SILVA; FERNANDES; SOMBRA, 2012).

Figura 3: DRAs de diversas geometrias.



Fonte: (LONG; MCALLISTER; SHEN, 1983)

As principais vantagens das DRAs são a flexibilidade e a versatilidade. Além disso, esses dispositivos usam diversas variedades de componentes físicos ou elétricos aplicáveis em sistemas de telecomunicação. Uma desvantagem das DRAs é no que tange à grande complexidade do processo de fabricação, pois é necessário seguir rigorosamente os passos de fabricação (PETOSA, 2007).

Segundo (LONG; MCALLISTER; SHEN, 1983), nas DRAs de geometria cilíndrica as superfícies podem ser consideradas condutores magnéticos perfeitos, desprezando os efeitos da sonda de alimentação. Assim, as funções de onda que são Modo Transversal Elétrico (TE) no eixo z e Modo Transversal Magnético (TM) no eixo z são escritos como:

$$\Psi_{TE_{n\phi m}} = J_n \left( \frac{X_{np}}{a} \rho \right) \left\{ \begin{array}{l} \sin n\phi \\ \cos n\phi \end{array} \right\} \sin \left[ \frac{(2m+1)\pi z}{2d} \right], \quad (17)$$

$$\Psi_{TM_{n\phi m}} = J_n \left( \frac{X'_{np}}{a} \rho \right) \left\{ \begin{array}{l} \sin n\phi \\ \cos n\phi \end{array} \right\} \cos \left[ \frac{(2m+1)\pi z}{2d} \right], \quad (18)$$

Com  $J_n$  sendo a função de Bessel de primeira ordem,  $a$  é diâmetro do cilindro e  $d$  é altura do cilindro,  $n=0, 1, 2, \dots$ ,  $p=0,1, 2, \dots$ ,  $m=0,1,2, \dots$

Fazendo  $J_n(X_{np}) = 0$ ,  $J'_n(X'_{np}) = 0$  e considerando a equação de separação

$$k_\rho^2 + k_z^2 = k^2 = \omega^2 \mu \epsilon, \quad (19)$$

Tem-se que:

$$f_{n\phi m} = \frac{1}{2\pi a \sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{\left\{ \begin{array}{l} X_{np}^2 \\ X'_{np}{}^2 \end{array} \right\} + \left[ \frac{\pi a}{2d} (2m+1) \right]^2}. \quad (20)$$

Para o modo fundamental  $TM_{110}$  a frequência ressonante é dada por

$$f_{TM_{110}} = \frac{1}{2\pi a \sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{X'_{11}{}^2 + \left[ \frac{\pi a}{2d} \right]^2}, \quad (21)$$

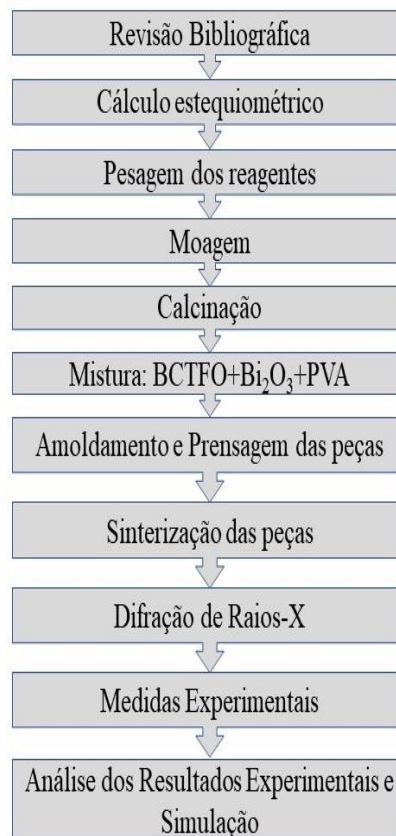
Onde  $X'_{11}{}^2 = 1,841$ .



## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como objetivo mostrar e explicar os procedimentos experimentais utilizados nesta dissertação. Com isso, são apresentados os componentes químicos, equipamentos e técnicas experimentais empregadas para a produção e caracterização das peças cerâmicas dielétricas estudadas. Além disso, foi explanado a metodologia das medições experimentais utilizadas nos compósitos fabricados. A Figura 4 indica resumidamente todos passos usados no procedimento experimental para adquirir os compósitos das adições de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  na matriz cerâmica BCTFO.

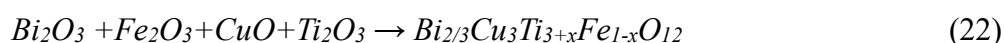
Figura 4: Fluxograma do Procedimento Experimental



Fonte: Autoral

#### 4.1 Fabricação da Matriz Cerâmica BCTFO

A produção da matriz cerâmica  $\text{BiCu}_3\text{Ti}_3\text{FeO}_{12}$  (BCTFO) foi feita através do método de reação em estado sólido. Para tal reação, foram preparados os reagentes em pó seguindo as proporções estequiométricas adequadas como indica a literatura. Os reagentes foram o  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (Sigma – Aldrich, 99% pureza),  $\text{CuO}$  (Vetec, 97% pureza),  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  (Sigma – Aldrich, 99% pureza) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Sigma – Aldrich, 99% pureza). A equação química que representa a formação da matriz cerâmica BCTFO é mostrada na equação 22 (LIANG et al., 2018).



Após isso, os reagentes químicos anteriormente citados foram pesados seguindo a estequiometria da equação (22) utilizando-se uma balança analítica. Depois, esses foram homogeneizados em um almofariz. Logo, a mistura foi colocada em invólucros de poliacetal, onde foram acrescentadas esferas de zircônia, cuja proporção foi de 97,7g esferas para cada 10g de reagentes. Posteriormente, foi usado um moinho Fritsch Pulverisette 5 como indica a figura 5 para fazer a moagem do material na qual é de suma importância para a uniformização e diminuição do tamanho dos grãos da mistura. A velocidade de moagem foi de 360 rpm e o tempo de moagem foi de 6 horas. Por último, o material obtido foi calcinado a  $800^\circ\text{C}$  por 4 horas em um forno cuja taxa de aquecimento foi de  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ .

Figura 5: Moinho Fritsch Pulverisette 5



Fonte: Autoral

## 4.2 Fabricação das Peças Cerâmicas

As peças cerâmicas foram feitas baseadas nas adições em massa de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  na matriz cerâmica BCTFO em proporções de 0%, 20%, 60%, 80% que serão chamadas respectivamente como BCTFO, BCTFO20Bi, BCTFO60Bi e BCTFO80Bi. Foram medidos 8 gramas totais para cada peça. Foi escolhido o  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , pois tal óxido poderia melhorar a estabilidade térmica dos compósitos e melhorar outros parâmetros como perda de retorno ou intensidade de radiação (SEBASTIAN, 2008).

Assim, foram feitas as misturas entre o BCTFO já calcinado com  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nessas proporções percentuais em massa no almofariz. Além disso, também se adicionou nos compósitos acima citados 5% em massa de PVA (Álcool polivinil) com objetivo de melhorar a resistência mecânica das peças cerâmicas.

Feito isso, as amostras foram inseridas para dentro de um molde cilíndrico de metal. Logo, elas sofreram uma pressão de 176,21 MPa em uma prensa hidráulica uniaxial por 5 minutos. Após amoldamento, as peças foram colocadas em uma plataforma coberta de alumina. Posteriormente, as amostras foram inseridas em um forno resistivo para serem sintetizadas a 700 °C saindo da temperatura ambiente onde a taxa de aquecimento foi de 5°C/min.

A figura 6 ilustra as ferramentas acima, como prensa hidráulica, almofariz e molde cilíndrico que foram usadas para a produção das peças.

Figura 6: Ferramentas de produção das peças.



Fonte: Autoral

### 4.3 Difração de Raios-X

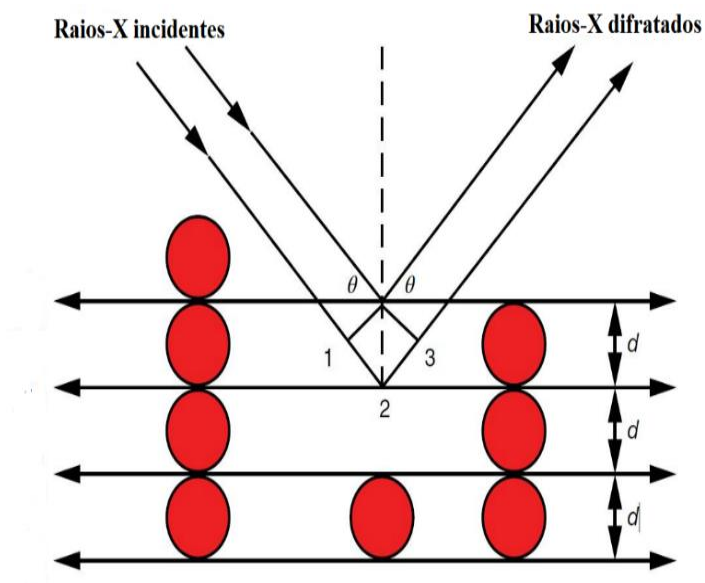
O método de difração de Raios-X é uma ferramenta de caracterização de materiais não destrutiva. Esse método é muito famoso e usado por diversos profissionais da ciência e tecnologia. Por meio de Raios X, pode-se analisar, identificar e determinar as estruturas cristalinas de uma infinidade de materiais (PANDEY, 2019). Os difratômetros de Raios-X operam segundo o princípio da lei de Bragg. A equação tal expressa a lei de Bragg:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (23)$$

Onde:  $d$  é a distância entre os planos cristalinos;  $\theta$  é o ângulo de Bragg;  $n$  é a ordem da difração e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

A figura 7 representa as matrizes bidimensionais de átomos em planos paralelos de um cristal recebendo um feixe de Raios-X.

Figura 7: Incidência de Raios-X nos planos cristalinos.



Fonte: (PANDEY, 2019)

No final do processo de difração é formado um perfil no qual foi possível identificar as fases presentes na matriz BCTFO e nos compósitos adicionados de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . As amostras foram analisadas empregando-se um difratômetro *XPert Pro MPD – Panalytical* com radiação  $\text{Cu-K}\alpha$  ( $\lambda = 1.54056 \text{ nm}$ ) no formato Bragg–Brentano em um passo de  $0,02^\circ$  sobre um intervalo

angular de 20° a 80°, com velocidade angular contínua a 25°C. Vale ressaltar que, tais medidas foram feitas no Laboratório de Raios-X da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Após isso, as fases foram identificadas por meio do software *X'Pert Highscore*. Com isso, a amostra pura de BCTFO foi refinada pelo método de refinamento de estruturas de Rietveld (RIETVELD, 1967) empregando-se padrões difratométricos do *International Crystal and Structure Database* (ICSD).

O software utilizado para fazer refinamento da amostra pura foi o GSAS (*General Structure Analysis System*). Dentre os principais parâmetros desse método se destacam  $R_{wp}$  e  $\chi^2$ . O  $R_{wp}$  é o erro residual enquanto o  $\chi^2$  é conhecido como *Goodness off it* também conhecido como parâmetro G. Para um bom resultado no refinamento é necessário que a amostra esteja em boas condições e também que não tenha impurezas, pois caso tenha isso acarretará em outra fase cristalina não desejada.

#### 4.4 Coeficiente de Temperatura da Frequência Ressonante

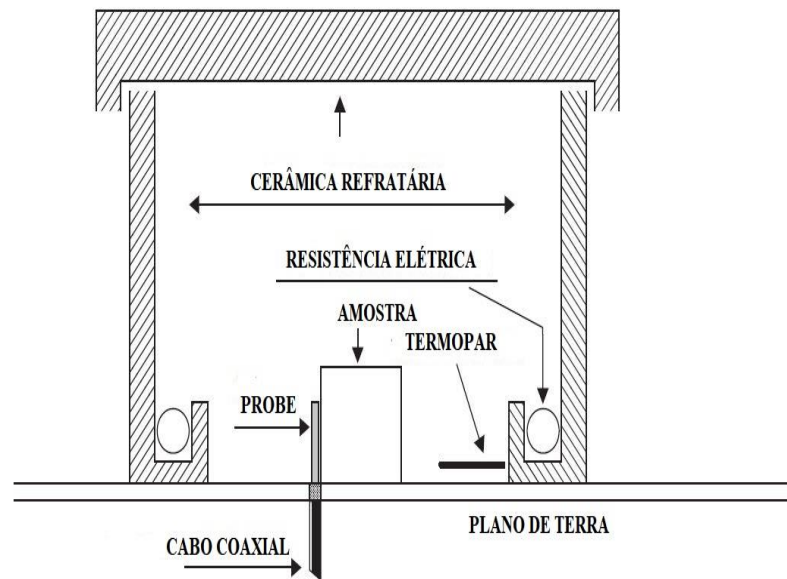
Para uma boa caracterização dielétrica das peças cerâmicas em micro-ondas, foram feitas medidas do coeficiente de temperatura da frequência ressonante ( $\tau_f$ ) através do método Silva-Fernandes-Sombra (SFS) (SILVA; FERNANDES; SOMBRA, 2012). Esse método consiste em medir o modo elétrico transversal ( $TE_{011}$ ) ao longo de um gradiente de temperatura por meio de um ressonador de haste dielétrica.

A principal utilização dessa medida para DRA é para saber o quanto a frequência ressonante se altera com a mudança de temperatura. Ao submeter um material à variação de temperatura este sofrerá dilatação. Logo, quando uma DRA sofre mudanças de temperatura teremos expansão ou contração do material e isso altera também a frequência de ressonância.

Para projetos de DRAs é interessante que o  $\tau_f$  seja o menor possível, pois em projetos não é desejado que a frequência de operação se altere. Foram feitas as medidas variando a temperatura de 30°C a 80°C. Após a obtenção desses dados, foi utilizado a equação (24) para calcular o  $\tau_f$  de cada peça cerâmica. A Figura 8 ilustra a vista lateral do método Silva-Fernandes-Sombra.

$$\tau_f = \frac{1}{f_i} \frac{\Delta f}{\Delta T} 10^6 \quad (24)$$

Figura 8: Dispositivo do método Silva-Fernandes-Sombra



Fonte: (SILVA; FERNANDES; SOMBRA, 2012)

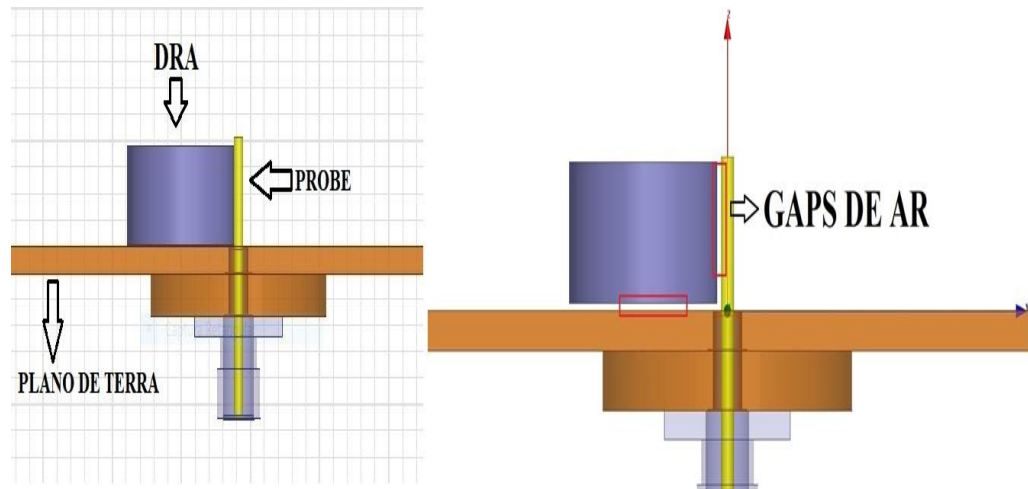
#### 4.5 Medidas de Monopolo

Para verificar a aplicação das peças cerâmicas em estudo como DRAs, foram feitas medidas de monopolo por meio de um analisador de rede (LONG; MCALLISTER; SHEN, 1983). O equipamento de monopolo é formado por um *probe*, plano de terra e analisador de rede. Para uma medição de qualidade é indicado que a DRA deverá permanecer perto da sonda. Para aplicações em antenas é necessário que a perda retorno seja de -10 dB. Logo, a perda de retorno é um dos parâmetros principais de medição de monopolo (PETOSA, 2007).

Vale lembrar que, infelizmente, existem imperfeições geométricas da ordem de micrometros na DRA provindas do processo de fabricação. Tais defeitos ocasionam os famosos *gaps* de ar que são brechas preenchidas por ar entre o *probe* e a amostra analisada (JUNKER et al., 1995).

Os *gaps* de ar são responsáveis por estimular diferentes valores na impedância de entrada e na frequência de ressonância da DRA (JUNKER et al., 1994). A figura 9 ilustra o equipamento de monopolo e a localização dos *gaps* verticais e horizontais da DRA.

Figura 9: Equipamento de Monopolo



Fonte: Autoral.

A medição de monopolo se fundamenta em excitar a DRA no modo  $HE_{11\delta}$  (Modo Híbrido Elétrico) e extrair parâmetros como perda de retorno, impedância real e impedância imaginária através. Além desses parâmetros, também é possível medir a permissividade das DRAs. Para isso, foi considerado a equação (25) segundo (PETOSA, 2007):

$$f_{HE11\delta} = \frac{6,324c}{2\pi a\sqrt{\varepsilon + 2}} \left[ 0,27 + 0,36 \frac{a}{2h} + 0,02 \left( \frac{a}{2h} \right)^2 \right] \quad (25)$$

Onde:  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $\varepsilon$  é a permissividade,  $a$  é o raio e  $h$  é a altura.

Ao fazer  $\alpha = \frac{6,324c}{2\pi a}$  e  $\beta = 0,27 + 0,36 \frac{a}{2h} + 0,02 \left( \frac{a}{2h} \right)^2$  se terá a seguinte equação:

$$f_{HE11\delta} = \frac{\alpha\beta}{\sqrt{\varepsilon + 2}} \quad (26)$$

Após modificações algébricas básicas, tem-se:

$$\varepsilon = \left( \frac{\alpha\beta}{f_{HE11\delta}} \right)^2 - 2, \quad (27)$$

Assim, por meio da equação (27) é possível obter as permissividades das DRAs.

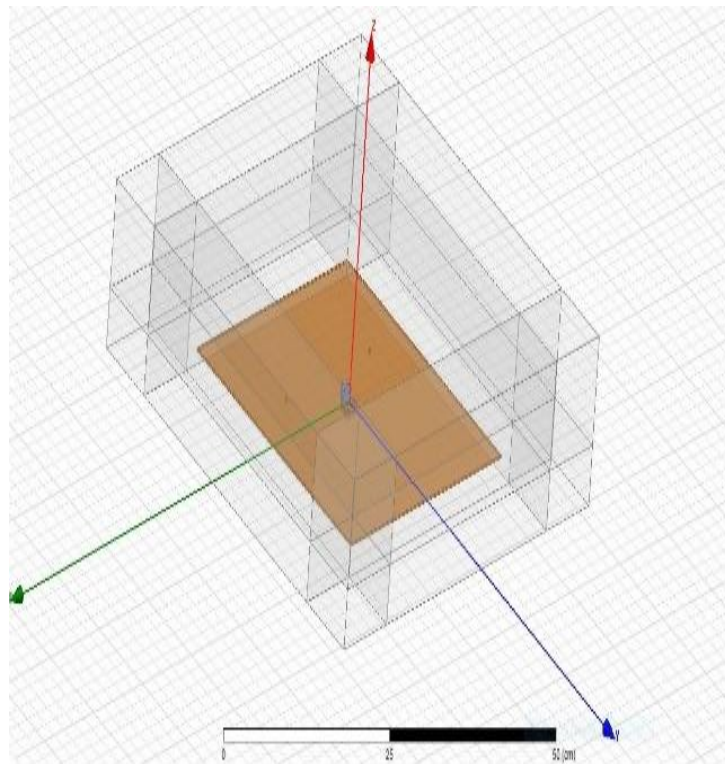
#### 4.6 Simulação Computacional

Com o intuito de obter parâmetros de antena, como diretividade, ganho, potência de radiação, eficiência e diagrama de radiação das DRAs produzidas, foram realizadas simulações numéricas através do programa HFSS (*High Frequency Structure Simulator*). O HFSS é um software baseado no método de elementos finitos e bem utilizado para simulação de DRAs (RANJAN; PANCHAL, 2017). A figura 10 ilustra o *design* em cad do modelo adotado na simulação do HFSS.

O modelo utilizado na simulação retrata a técnica de monopolo onde a DRA é considerada um cilindro perfeito que irradia campo eletromagnético em uma caixa de ar. Com isso, foram inseridas as medições de micro-ondas como perda de retorno, impedância real, impedância imaginária, altura e raio das amostras no modelo adotado do HFSS.

Também foi considerado no modelo adotado os *gaps* de ar horizontais e verticais de cada amostra nos quais foram estimados através da simulação computacional.

Figura 10: Modelo computacional inspirado na técnica de Monopolo



Fonte: Autoral.



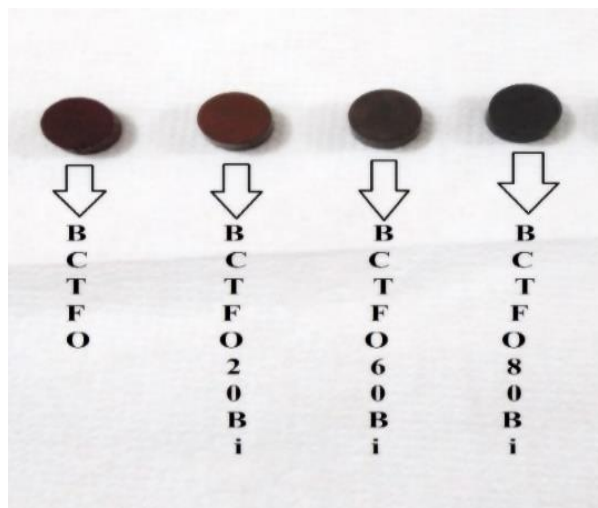
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O atual capítulo tem como objetivo mostrar as análises, interpretações e resultados dos procedimentos experimentais. Com isso, pode-se citar os tratamentos de acabamento dos compósitos produzidos, difração de Raios-X, coeficiente de temperatura da frequência ressonante das DRAs e medidas de monopolo das DRAs. Também são mostrados os parâmetros de antena, como ganho, diretividade e eficiência das DRAs produzidas por meio do *software* HFSS.

### 5.1 Amostras Cerâmicas Produzidas

Em posse das amostras produzidas, essas passaram por um processo de acabamento para retirar rebarbas. As ferramentas usadas para o processo de acabamento foram lixas de carvão. Vale ressaltar que, como as amostras são cerâmicas é necessário cuidados ao utilizar tais ferramentas, pois caso seja cometido exageros na hora de lixar isso poderá comprometer a peça ao ponto de ser necessário refazê-la. A figura 11 mostra as peças produzidas já polidas.

Figura 11: Peças produzidas



Fonte: Autoral.

Após isso, as peças foram medidas por meio de um micrômetro. Assim, foram obtidos os parâmetros geométricos como diâmetro, raio e altura das amostras. Notou-se que os diâmetros das peças diminuíram à medida que se aumentou o percentual de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  na

composição dessas e isso é explicado ao fato de o  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  ser um fundente. As medidas das amostras estão na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros geométricos das amostras

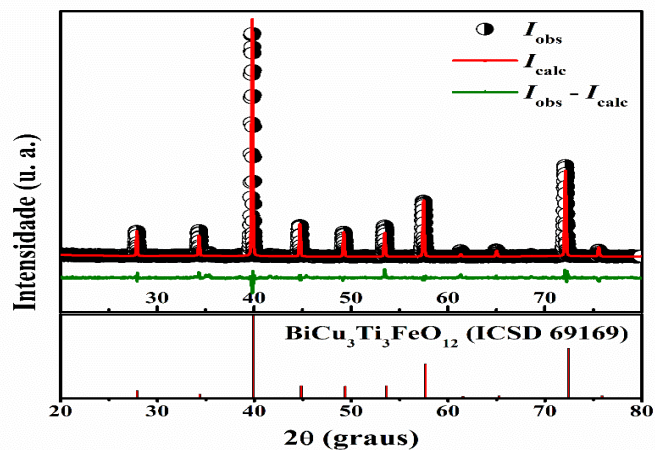
Amostras	Diâmetro (mm)	Raio (mm)	Altura (mm)
BCTFO	15,19	7,60	7,60
BCTFO20Bi	15,30	7,65	7,66
BCTFO60Bi	15,25	7,63	7,68
BCTFO80Bi	15,09	7,54	7,56

Fonte: Autoral.

## 5.2 Difração de Raios-X das DRAs

A figura 12 mostra o difratograma para a amostra BCTFO. O refinamento empregou a fase isoestrutural  $\text{Bi}_{0,667}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  (ICSD *code* 69169) como padrão estrutural, pois o BCTFO não possui ICSD *code*. O refinamento indicou a presença de fase única  $\text{BiCu}_3\text{Ti}_3\text{FeO}_{12}$  que está de acordo com a literatura científica (LIANG et al., 2018). Os parâmetros de qualidade do refinamento foram  $R_{\text{WP}} = 20,78\%$ ,  $\chi^2 = 1,26$ , confirmando uma estrutura cúbica de grupo espacial  $\text{Im-3}$  e densidade de  $5,71 \text{ g/cm}^3$ . Os parâmetros de rede obtidos foram:  $a=b=c=7,458 \text{ \AA}$ .

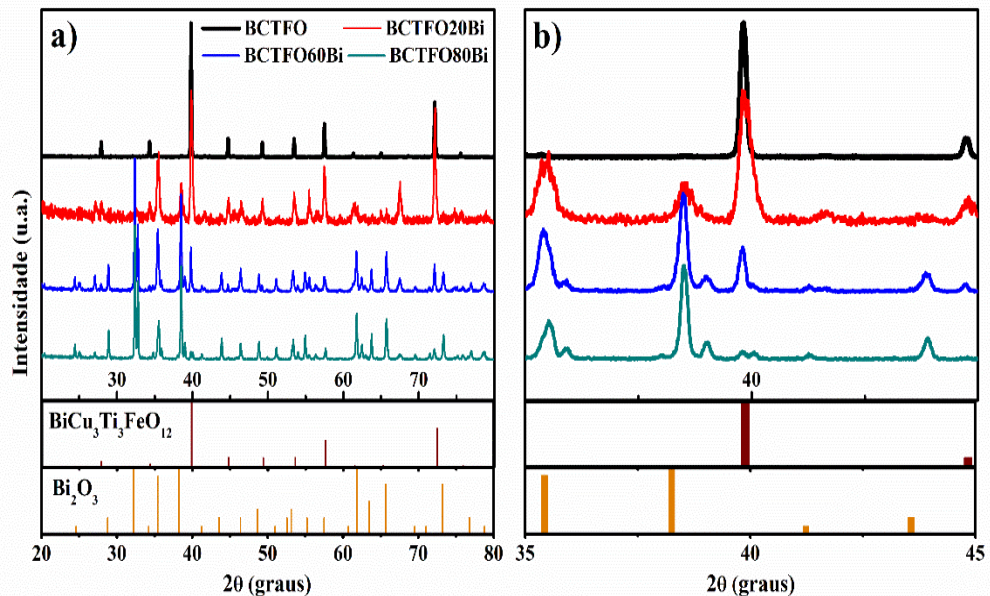
Figura 12 – Difratograma da amostra BCTFO



Fonte: Autoral.

A Figura 13 parte a) mostra os padrões de difração e as fases identificadas para as amostras BCTFO, BCTFO20Bi, BCTFO60Bi, BCTFO80Bi. Para os compósitos, identificou-se a presença das fases  $\text{BiCu}_3\text{Ti}_3\text{FeO}_{12}$  e  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . A Figura 13 parte b) mostra uma ampliação dos difratogramas destacando o intervalo de  $2\theta = 30^\circ$  e  $2\theta = 45^\circ$  onde se observam os picos de maior intensidade de ambas as fases. Nota-se, ainda, que com o aumento da adição de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  no compósito evidenciam-se os picos referentes a esta fase, passando a predominar nas altas adições deste componente.

Figura 13 – a) padrões de difração das amostras e b) ampliação dos difratogramas



Fonte: Autoral.

### 5.3 Coeficiente de Temperatura da Frequência Ressonante das DRAs

A Tabela 2 mostra os valores de  $\tau_f$  em função da concentração de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  das peças obtidas experimentalmente através a técnica Silva–Fernandes–Sombra (SFS).

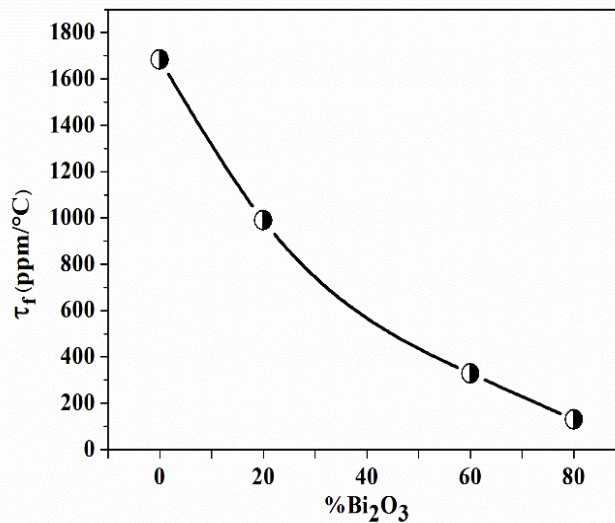
Tabela 2- Valores do  $\tau_f$  das DRAs

Peça	BCTFO	BCTFO20Bi	BCTFO60Bi	BCTFO80Bi
$\tau_f$ (ppm $^\circ\text{C}^{-1}$ )	1683,21	990,05	328,51	129,59

Fonte: Autoral

Após análise da Tabela 2, é notório a diminuição do  $\tau_f$  com a adição de óxido de bismuto. Com isso, tal aspecto é desejável, pois em projetos de engenharia de telecomunicações o  $\tau_f$  da DRA deve variar entre  $-10 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$  a  $10 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$  (SILVA; FERNANDES; SOMBRA, 2012). A Figura 14 mostra como  $\tau_f$  varia em função do percentual de adição de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nas amostras.

Figura 14 - Gráfico  $\tau_f$  versus % de adição de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .



Fonte: Autoral.

#### 5.4 Medidas de Monopolo das DRAs

Os resultados da caracterização elétrica em micro-ondas utilizando a técnica de Monopolo são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3- Propriedades dielétricas das DRAs

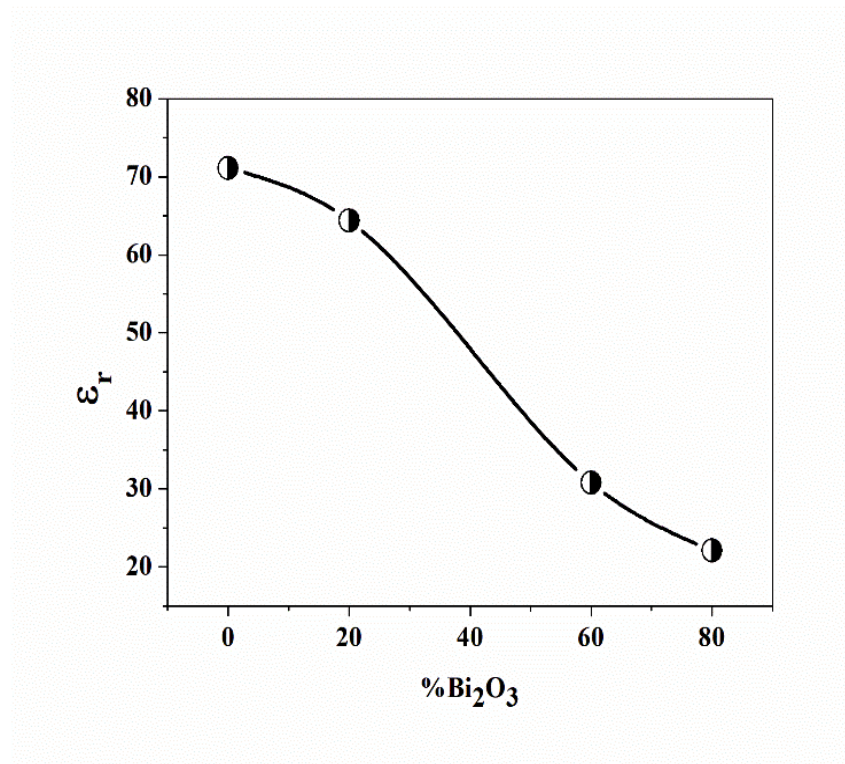
Peça	BCTFO	BCTFO20Bi	BCTFO60Bi	BCTFO80Bi
$\epsilon_r$	71,11	64,39	30,80	22,11
$f_r$ (GHz)	2,51	2,42	3,10	3,65
$S_{11}$ (dB)	-51,31	-24,84	-46,66	-29,35

Fonte: Autoral.

Foi percebido que a permissividade relativa diminui com a adição de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Com isso, a peça BCTFO80Bi apresentou menor permissividade relativa, ou seja, 21. Segundo SEBASTIAN (2008), uma baixa permissividade relativa resulta em uma alta velocidade de propagação do sinal da DRA. As amostras que possuem dopagem de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  a partir de 20% sofreram um aumento da frequência de ressonância quando comparadas entre si.

No que se refere à perda de retorno representada por  $S_{11}$ , as peças produzidas possuem menos que -10 dB e isso segundo PETOSA (2007) indica que tais amostras realmente podem ser aplicadas como DRAs. A Figura 15 mostra como a permissividade relativa se comporta em relação % de adição de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nas amostras.

Figura 15- Gráfico  $\epsilon_r$  versus % de adição de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nas amostras



Fonte: Autoral.

### 5.5 Simulação Computacional das DRAs

Inicialmente, os dados de entrada para a simulação de DRA adotado neste trabalho foram os parâmetros já anteriormente citados como diâmetro, raio e altura das amostras. Também foram inseridos permissividade relativa, *gaps* de ar (horizontais e verticais) e tangente de perda como indica a Tabela 4.



Vale ressaltar que os *gaps* de ar e tangente de perda das amostras analisadas foram determinados através do método da tentativa e erro.

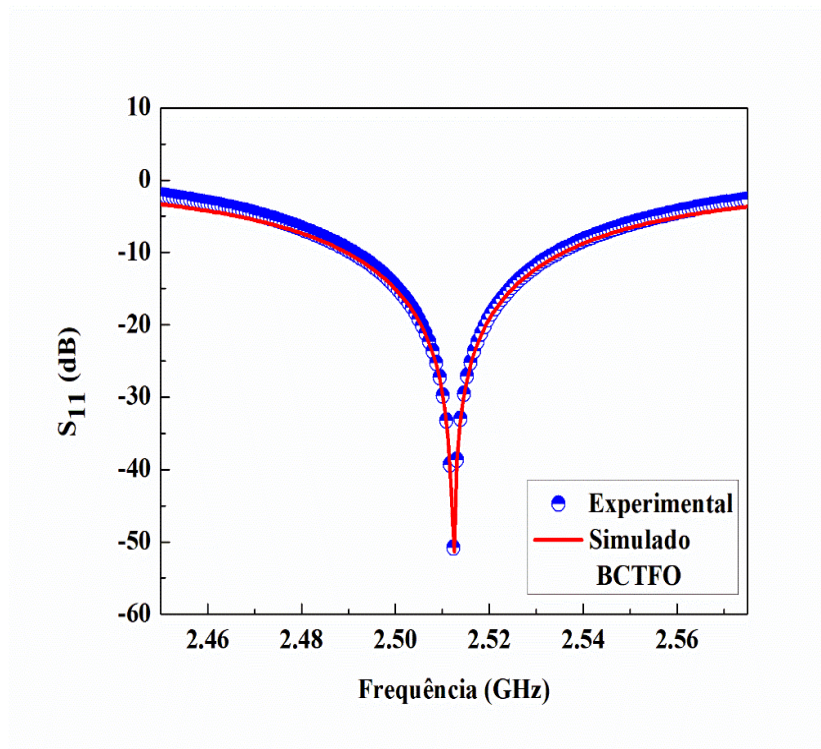
Tabela 4- Parâmetros de entrada na simulação

Amostra	Diâmetro (mm)	Raio (mm)	Altura (mm)	$\epsilon_r$	$f_r$ (GHz)	$tg\delta$
<b>BCTFO</b>	15,19	7,60	7,60	71,11	2,51	0,01
<b>BCTFO20Bi</b>	15,30	7,65	7,66	64,39	2,42	0,02
<b>BCTFO60Bi</b>	15,25	7,63	7,68	30,80	3,10	0,02
<b>BCTFO80Bi</b>	15,09	7,54	7,56	22,11	3,65	0,012

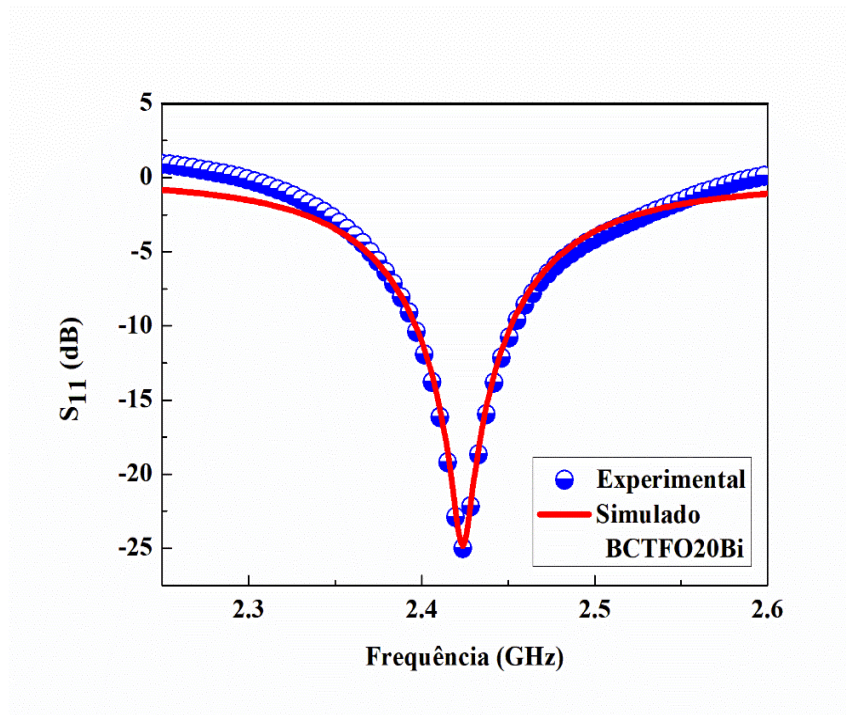
Fonte: Autoral.

Após isso, foram obtidos os resultados primeiramente para a perda de retorno ( $S_{11}$ ) onde as Figuras (16-19) mostram os resultados simulados juntamente com os valores experimentais das amostras BCTFO, BCTFO20Bi, BCTFO60Bi e BCTFO80Bi.

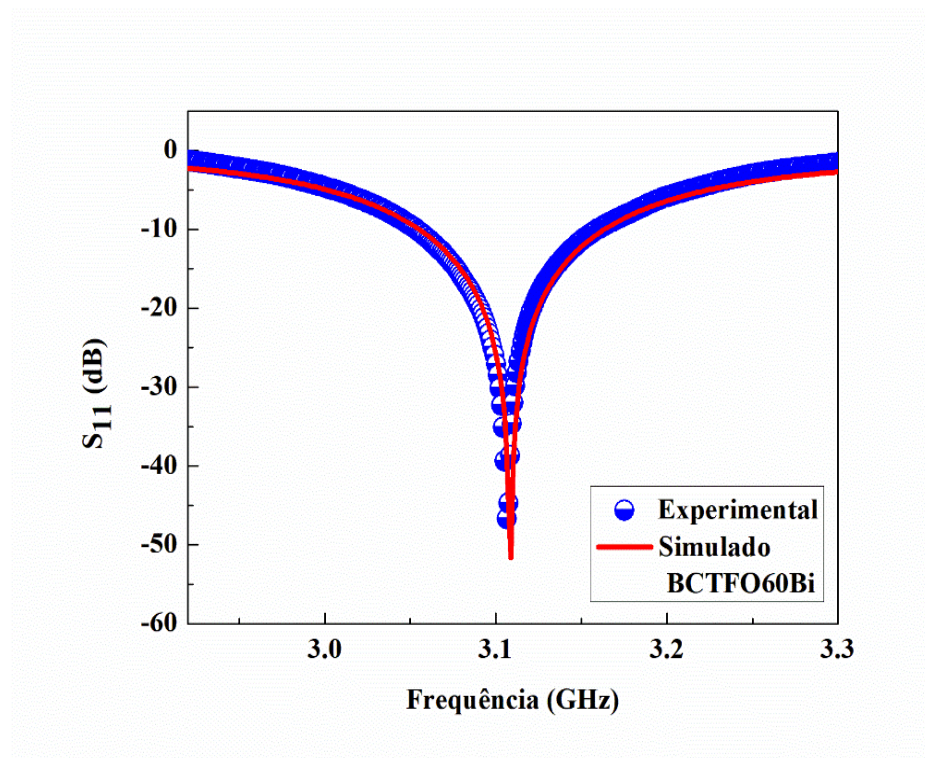
Figura 16- Gráfico  $S_{11}$  versus frequência para amostra BCTFO



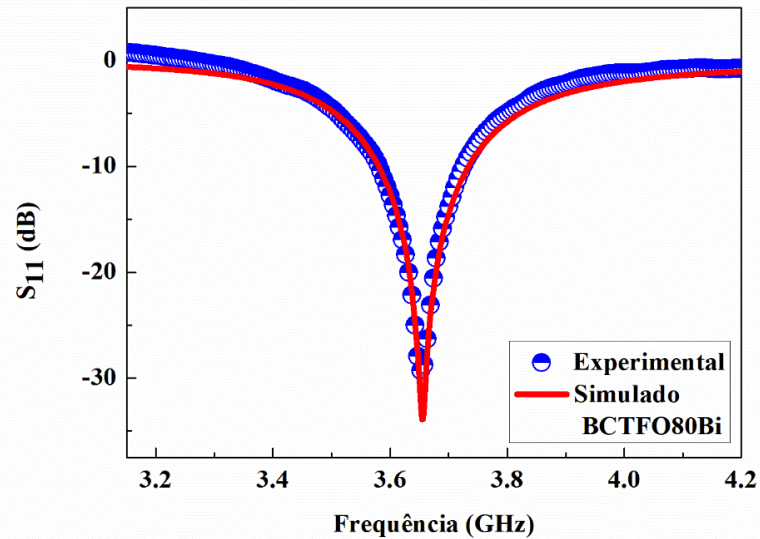
Fonte: Autoral.

Figura 17- Gráfico  $S_{11}$  versus frequência para amostra BCTFO20Bi

Fonte: Autoral.

Figura 18- Gráfico  $S_{11}$  versus frequência para amostra BCTFO60Bi

Fonte: Autoral.

Figura 19- Gráfico  $S_{11}$  versus frequência para amostra BCTFO80Bi

Fonte: Autoral.

Diante da análise dos gráficos acima, pode-se afirmar que os resultados simulados e experimentais são convergentes. A Tabela 5 indica os erros percentuais de cada peça para deixar mais claro a convergência dos resultados acima expostos. Com isso, também pode-se afirmar com mais embasamento teórico que as DRAs acima citadas podem ser aplicadas na faixa de 2-4 GHz. Ainda na Tabela 5, nota-se que a amostra BCTFO20Bi foi a que possui menor erro percentual e a amostra BCTFO80Bi possui maior erro percentual. As discrepâncias nos erros são devidas as incertezas das medidas experimentais como tamanho das peças, *gaps* de ar, defeitos de fabricação das amostras, entre outras.

Tabela 5 - Valores experimentais e simulados do  $S_{11}$ 

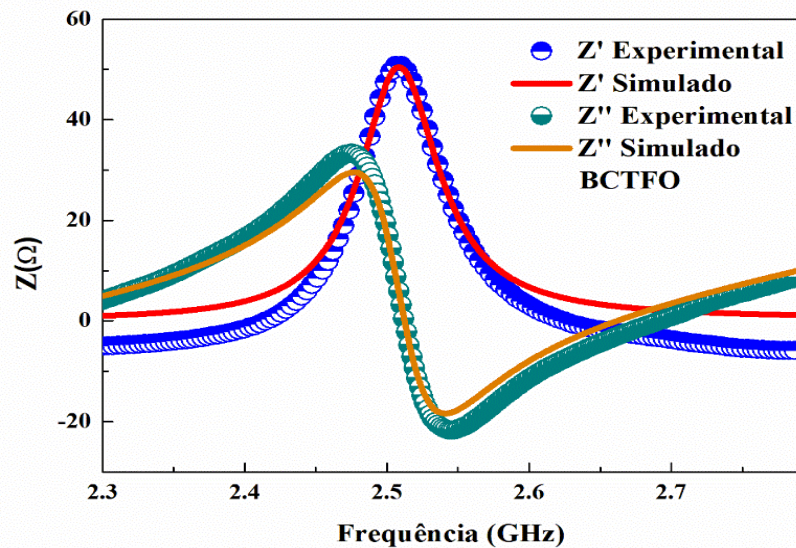
Amostra	$S_{11}$		
	Experimental (dB)	Simulado (dB)	Erro (%)
<b>BCTFO</b>	-50,77	-51,28	1
<b>BCTFO20Bi</b>	-25,04	-24,84	0,8
<b>BCTFO60Bi</b>	-48,61	-51,61	5,8
<b>BCTFO80Bi</b>	-29,35	-33,92	13,5

Fonte: Autoral.



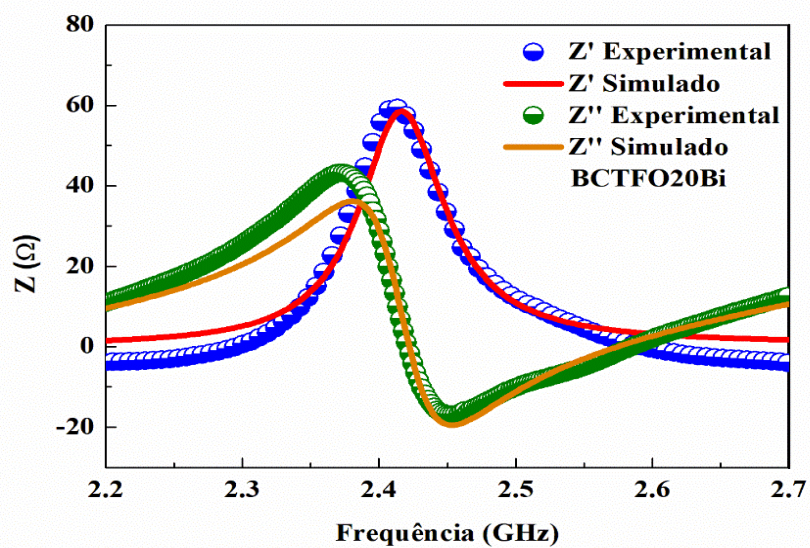
Segundamente, tem-se o comportamento das impedâncias reais e imaginárias ( $Z'$  e  $Z''$ ) em função da frequência foram indicadas nas Figuras 20– 23.

Figura 20 - Gráfico  $Z'$  e  $Z''$  em função da frequência para amostra BCTFO

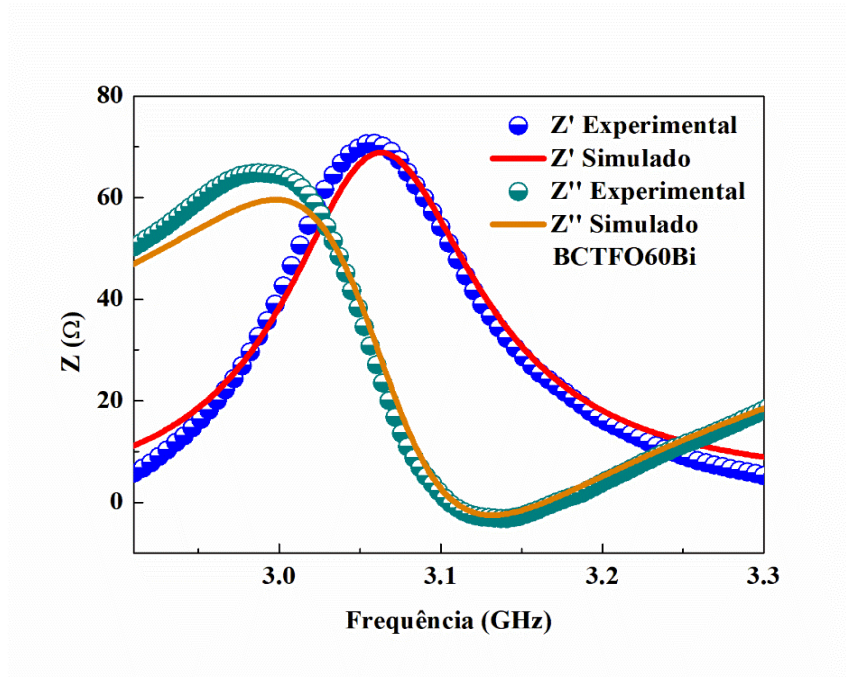


Fonte: Autoral.

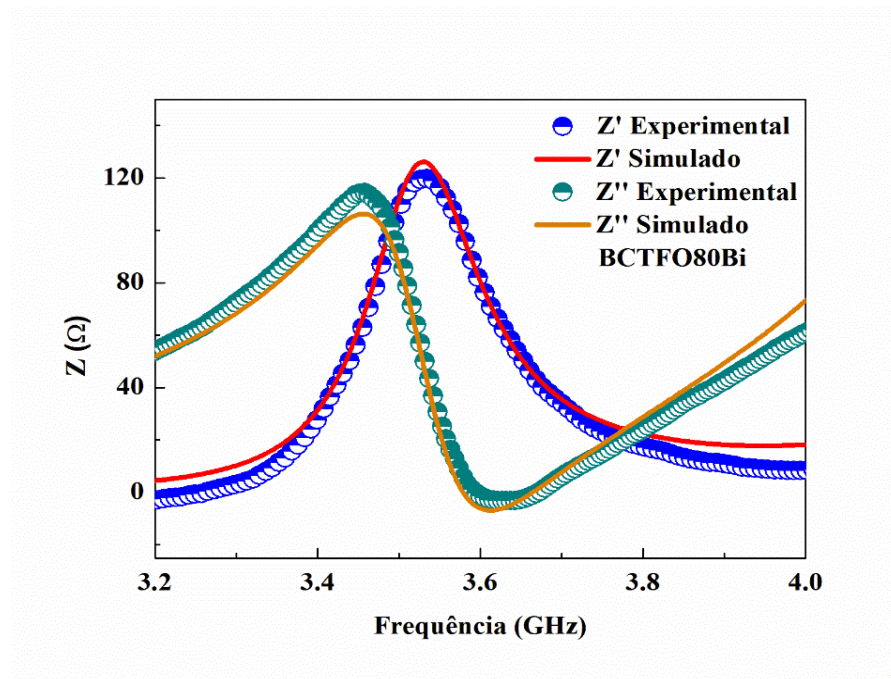
Figura 21 - Gráfico  $Z'$  e  $Z''$  em função da frequência para amostra BCTFO20Bi



Fonte: Autoral.

Figura 22 - Gráfico  $Z'$  e  $Z''$  em função da frequência para amostra BCTFO60Bi

Fonte: Autoral.

Figura 23 - Gráfico  $Z'$  e  $Z''$  em função da frequência para amostra BCTFO80Bi

Fonte: Autoral.

Por meio da análise dos gráficos acima, pode-se afirmar uma boa concordância para as curvas experimentais e simuladas para todas as impedâncias. A Tabela 6 e 7 mostram os valores experimentais, valores simulados e erros das impedâncias reais ( $Z'$ ) e imaginárias ( $Z''$ ).

Tabela 6 - Valores experimentais e simulados de  $Z'$

Amostra	$Z'$		
	Experimental ( $\Omega$ )	Simulado ( $\Omega$ )	Erro (%)
<b>BCTFO</b>	33,34	29,56	12,78
<b>BCTFO20Bi</b>	59,48	58,51	1,66
<b>BCTFO60Bi</b>	70,75	68,88	2,71
<b>BCTFO80Bi</b>	119,83	126,13	5,00

Fonte: Autoral.

Tabela 7 - Valores experimentais e simulados de  $Z''$

Amostra	$Z''$		
	Experimental ( $\Omega$ )	Simulado ( $\Omega$ )	Erro (%)
<b>BCTFO</b>	50,92	50,49	0,85
<b>BCTFO20Bi</b>	43,24	36,18	19,5
<b>BCTFO60Bi</b>	64,91	59,62	8,87
<b>BCTFO80Bi</b>	114,18	106,28	7,43

Fonte: Autoral.

Nota-se que para a impedância real, a amostra BCTFO20Bi possui menor erro percentual e amostra BCTFO possui maior erro percentual. Isso é justificado pela a distância entre as curvas que por sua vez foi causada pela não ressonância de impedância entre a amostra e o equipamento de monopolo.

Agora, foram analisados os parâmetros de antena nos quais são fundamentais para o estudo de DRAs. Pode-se citar como variáveis de campo distante o diagrama de radiação, diretividade máxima, ganho máximo, potência de entrada, potência irradiada e eficiência. Com isso, as Figuras 24 – 27 mostram como são os diagramas de radiação em três dimensões para as quatro DRAs em estudo.

Figura 24 - Diagrama de radiação para amostra BCTFO



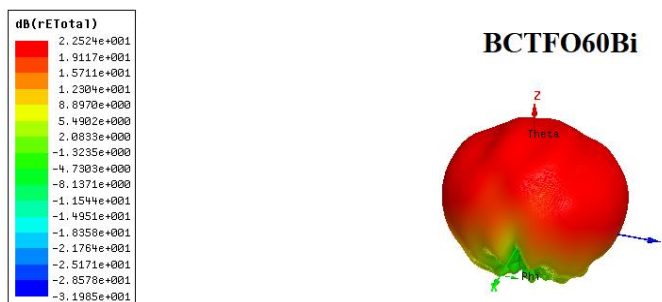
Fonte: Autoral.

Figura 25 - Diagrama de radiação para amostra BCTFO20Bi



Fonte: Autoral.

Figura 26 - Diagrama de radiação para amostra BCTFO60Bi



Fonte: Autoral.

Figura 27 - Diagrama de radiação para amostra BCTFO80Bi



Fonte: Autoral.

Tabela 8 – Parâmetros de antena

Amostra	$U_{\text{máx}}$ (W/sr)	$D_{\text{máx}}$ (dB)	$G_{\text{máx}}$ (dB)	$P_{\text{rad}}$ (W)	$P_{\text{ent}}$ (W)	$e$ (%)
BCTFO	0,25	6,54	4,88	0,68	0,99	68,36
BCTFO20Bi	0,19	6,60	3,82	0,52	0,99	52,77
BCTFO60Bi	0,24	6,57	4,74	0,65	0,99	65,55
BCTFO80Bi	0,29	6,42	5,64	0,83	0,99	83,68

Fonte: Autoral.

Percebe-se que com o aumento de concentração percentual de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nas amostras a intensidade máxima, ganho máximo e eficiência melhoram, mas a partir de 20%. Com isso, a amostra BCTFO80Bi é amostra mais eficaz. Tal resultado pode ser considerado como promissor, pois a DRA consegue radiar mais energia no espaço e isso é desejado em muitos projetos de telecomunicações. Então, a adição progressiva de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  na matriz cerâmica BCTFO otimiza os parâmetros de antena.

## 6 CONCLUSÃO

Os novos compósitos formados pela matriz cerâmica BCTFO adicionada de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  em diferentes percentuais (0%, 20%, 60% e 80%), possuem altos valores de coeficiente de temperatura da frequência ressonante, mas à medida que se aumenta percentualmente o  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nos compósitos é notado a diminuição do coeficiente de temperatura da frequência ressonante.

No que se refere à permissividade relativa, também é notado uma diminuição desse parâmetro à medida que é adicionado o  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nas amostras. Todos os compósitos possuem permissividade que foram de 71 a 21 e perdas de retorno abaixo de -10 dB na frequência de micro-ondas. Esses dois fatores já indicam que tais amostras podem ser usadas como DRAs.

A frequência de ressonância das amostras foram de 2,42 GHz a 3,65 GHz. Pode-se ver que o aumento da frequência de ressonância se deu com o aumento percentual de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nas amostras a partir de 20%. A tangente de perda para tais compósitos foi relativamente alta em comparação a outros materiais usados como DRA, mas isso pode ser melhorado ao elevar a temperatura de sinterização do material, por exemplo.

Todas as amostras fabricadas podem ser usadas como DRAs na banda S (2-4 GHz). Em relação aos parâmetros de antena, as DRAs produzidas tiveram no geral possuem bons parâmetros de antena, pois elas possuem diretividade acima 6 dB e eficiência acima de 50%. Notoriamente, a amostra BCTFO80Bi possui ótimos valores de ganho, eficiência e coeficiente de temperatura da frequência ressonante em relação as demais amostras produzidas.

Com isso, os resultados indicam que com mais adições percentuais de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  nas amostras são melhorados os ganhos, as eficiências e as estabilidades térmicas dos compósitos em micro-ondas. Dessa forma, esses compósitos se tornam ainda mais atraentes para projetos de engenharia de micro-ondas.

Vale ressaltar que, ainda não foram encontrados estudos científicos da matriz cerâmica BCTFO dopada com  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  como DRA na faixa de micro-ondas. Consequentemente, este trabalho se destaca como inovador e promissor.

## REFERÊNCIAS

- BALANIS, C.A. **Antenna theory: analysis and design**. • 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 2016.
- BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- GUSTRAU, F. **RF and microwave engineering: fundamentals of wireless communications**. Chichester: John Wiley & Sons, 2012.
- JUNKER, G. P. et al. Effect of air gap on cylindrical dielectric resonator antenna operating in TM<sub>01</sub> mode. **Electronics Letters**, v. 30, n. 2, p. 97–98, 1994.
- JUNKER, G. P. et al. Effect of fabrication imperfections for ground-plane-backed dielectric-resonator antennas. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 37, n. 1, p. 40–47, 1995.
- LIANG, P. et al. Electric response and improved dielectric properties in BiCu<sub>3</sub>Ti<sub>3</sub>FeO<sub>12</sub>. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 734, p. 9–15, 2018.
- LONG, S. A.; MCALLISTER, M. W.; SHEN, L. C. The Resonant Cylindrical Dielectric Cavity Antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 31, n. 3, p. 406–412, 1983.
- NEWNHAM, R. E. Composite electroceramics. **Ferroelectrics**, v. 68, n. 1, p. 1–32, 1986.
- PANDEY, R. K. **Fundamentals of electroceramics**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019.
- PETOSA, A. **Dielectric resonator antenna handbook**. Norwood: Artech House Publishers, 2007.
- RANJAN, P. K. V.; PANCHAL, J. R. Dielectric Resonator Antenna and its Design Parameters- A Review. **International Research Journal of Advanced Engineering and Science**, v. 2, n. 4, p. 128–133, 2017.
- RIETVELD, H. M. Line profiles of neutron powder-diffraction peaks for structure refinement. **Acta Crystallographica**, v. 22, n. 1, p. 151–152, 1 jan. 1967.
- SEBASTIAN, M. T. **Dielectric materials for wireless communication**, San Diego: Elsevier, 2008.
- SHI, P. et al. Intrinsic and extrinsic dielectric responses in BiCu<sub>3</sub>Ti<sub>3</sub>FeO<sub>12</sub> ceramics. **Ceramics International**, v. 41, n. 3, p. 3672–3676, 2015.
- SILVA, M. A. S.; FERNANDES, T. S. M.; SOMBRA, A. S. B. An alternative method for the measurement of the microwave temperature coefficient of resonant frequency ( $\tau_f$ ). **Journal of Applied Physics**, v. 112, n. 7, p. 074106, out. 2012.
- WILLIAM D. CALLISTER, J.; DAVID G. RETHWISCH. **Fundamentals of materials science and engineering**, • 5th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

## PRODUÇÃO CIENTÍFICA

### Trabalho Apresentado em Evento Nacional

1. COLARES D.M.; FREITAS D. B.; SILVA M. A. S.; SOMBRA A. S.; Um estudo das propriedades elétricas e dielétricas da matriz cerâmica  $\text{BiCu}_3\text{Ti}_3\text{FeO}_{12}$  pura e dopada com  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . XVII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Uberlândia, Minas Gerais, 2019.

### Pedido de Depósito de Patente

1. COLARES D.M.; FREITAS D. B.; ABREU R.F.; VASCONCELOS S.J.T.; A. S. SOMBRA; Um novo compósito de  $\text{BiCu}_3\text{Ti}_3\text{FeO}_{12}$  (BCTFO) adicionado com óxido de bismuto ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) com coeficiente de temperatura da frequência ressonante ( $\tau_f$ ) próximo de zero na região de micro-ondas. 2019, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020200058053, título: "Um novo compósito de  $\text{BiCu}_3\text{Ti}_3\text{FeO}_{12}$  (BCTFO) adicionado com óxido de bismuto ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) com coeficiente de temperatura da frequência ressonante ( $\tau_f$ ) próximo de zero na região de micro-ondas.", Instituição de registro: INPI -Instituto Nacional da Propriedade Industrial, Depositante (s): Antonio Sergio Bezerra Sombra; Universidade Federal do Ceará.

### Trabalhos Submetidos em Congresso

1. Caracterização dielétrica e investigação numérica do compósito de  $\text{BiCu}_3\text{Ti}_3\text{FeO}_{12}$  com adição de 20% de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  para aplicações em micro-ondas. Submetido no 64° Congresso Brasileiro de Cerâmica.
2. Estudo experimental da argila kimberlito do Brasil na aplicação de antenas ressoadoras dielétricas na faixa de micro-ondas. Submetido no 64° Congresso Brasileiro de Cerâmica.
3. Investigação das propriedades dielétricas em radiofrequência da argila kimberlito do Brasil. Submetido no 64° Congresso Brasileiro de Cerâmica.