

# Análise das propriedades dielétricas da matriz cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3$ com a adição de $\text{TiO}_2$ para aplicação como antena ressoadora dielétrica

Luiz Nonato Lopes de Oliveira (IFCE/LOCEM), Raphael Victor Barros Campos (IFCE/LOCEM), Marcelo Antônio Santos da Silva (UFC/LOCEM), Daniel Xavier Gouveia (IFCE/LOCEM), Antônio Sergio Bezerra Sombra (UFC/LOCEM)

**Resumo**—O presente trabalho tem como objetivo apresentar as características de uma antena ressoadora dielétrica (ARD) fabricada a partir da matriz cerâmica de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com a adição de óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), método este empregado para melhorar as propriedades dielétricas da matriz cerâmica, favorecendo sua utilização em circuitos de micro-ondas e RF. Após as análises dos resultados, confirmou-se o material como boa alternativa para a aplicação em telecomunicações como ARD, apresentando ganhos em torno de 3,76 dBi e eficiência de 99,07%.

**Palavras-Chave**—Antenas; cerâmicas; perda de retorno; diagrama de radiação.

**Abstract**—This paper aims to present the characteristics of an dielectric resonator antenna (DRA) made from alumina ceramic matrix ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) with the addition of titanium oxide ( $\text{TiO}_2$ ), the method used to improve the dielectric properties of the ceramic matrix favoring its use in microwave and RF circuits. After analyzing the results, it was confirmed the material as a good alternative for application in telecommunications as ARD, with gains around 3,76 dBi and 99,07% efficiency.

**Keywords**—Antennas; ceramics; return loss; radiation pattern.

## I. INTRODUÇÃO

As recentes conquistas no setor de telecomunicações em paralelo aos avanços nas ciências dos materiais têm contribuído para um novo cenário de tecnologias e dispositivos para a comunicação sem fio.

O crescimento de novas plataformas de rede de comunicação e a crescente demanda impulsionada pela internet tornou os usuários mais exigentes, pois estar conectado não é o suficiente, é necessário ter mobilidade e disponibilidade na rede. Desta forma tornou-se fundamental a pesquisa e o desenvolvimento de materiais que atendam essas novas exigências tanto para os projetos de circuitos, quanto aos demais dispositivos de comunicações. Uma vez que tais componentes tendem a ser cada vez menores, discretos, leves e com boas propriedades dielétricas. Além disso, devem apresentar alta eficiência de radiação[1].

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Ressonadores Dielétricos

Os ressoadores dielétricos (RD) foram primeiramente utilizados em circuitos de micro-ondas como osciladores e filtros [2],[3]. De início as aplicações eram apenas para componentes que pudessem armazenar energia ou guias de ondas. Então notou-se que ao remover-se a blindagem e a utilização de uma alimentação adequada para excitar o modo adequado, verificou-se que estes mesmos ressoadores dielétricos poderiam se tornar radiadores eficientes, com isso, podendo ser aplicados em um vasto intervalo de frequências[2],[3].

As propriedades apresentadas pelos materiais são de interesse para a construção de um RD, sendo que os principais critérios analisados são um alto fator de qualidade (Q), alta permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) e coeficiente de temperatura da frequência de ressonância próximo a zero ( $\tau_f$ ).

As ARD's apresentam uma grande diversidade de geometrias, mas a mais usual é a cilíndrica, sendo estas produzidas a partir da composição de materiais que apresentem propriedades de interesse, tais como uma alta permissividade de constante dielétrica  $\epsilon_r > 25$  e um fator Q com valores entre 50 e 500 [2]–[4].

Para o desenvolvimento deste trabalho os ressoadores dielétricos foram preparados misturando-se os óxidos  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Alcoa) e  $\text{TiO}_2$  (Vetec). Os cilindros cerâmicos foram preparados com uma mistura dos óxidos e álcool polivinílico (PVA) e submetidos a uma prensa uniaxial, sob uma pressão constante de 220 kPa num molde metálico. Para o estudo das propriedades dielétricas nas faixas de micro-ondas foi utilizada a técnica de Hakki-Coleman[5], [6]. Para a aquisição de dados foi utilizado o *Network Analyzer* da Agilent modelo N5230A. As simulações computacionais foram realizadas através do software *High Frequency Structural Simulator* (HFSS).

### B. Antenas Ressonadoras Dielétricas

Uma antena pode ser definida como uma estrutura geométrica constituída de um material que permite o movimento de cargas elétricas que, ao ser submetido a uma excitação (tensão ou corrente elétricas) produz campos eletromagnéticos. As antenas também podem ser denominadas de transdutores, isso porque atuam em uma região de transição

convertendo a propagação de ondas em uma linha de transmissão para o espaço livre [7], [8].

No ano de 1983 o professor S. A. Long propôs através da publicação de um trabalho a utilização do ressoador dielétrico como antena (antenas ressoadoras dielétricas em formato cilíndrico) [9]. Ao comparar as antenas ressoadoras dielétricas com as tradicionais antenas metálicas percebeu-se que estas não apresentam perdas por condução elétrica. Na prática as pequenas perdas que apresentam estão relacionadas a imperfeições que podem surgir durante o processo de fabricação dos dielétricos, assim como dos materiais utilizados. Devido a isso, e a outras vantagens apresentadas tem crescido seu emprego na faixa de micro-ondas e ondas milimétricas, uma vez que as antenas ressoadoras dielétricas apresentam elevada eficiência de radiação por ocorrer poucas perdas em virtude da ausência de metais, diferente das antenas metálicas, onde as perdas por condução são muito grandes [2], [7], [8].

A geometria cilíndrica da ARD favorece uma elevada flexibilidade de configurações, onde as características como frequência de ressonância ( $f_0$ ) e fator de qualidade podem ser controladas pela razão entre o raio  $a$  e a altura  $h$  do ressoador [2] e pela constante dielétrica do material constituinte do ressoador. A configuração utilizada é mostrada na Figura 1 e favorece o modo  $HE_{11\delta}$  da ARD com o modo de menor frequência ou o modo dominante, conforme a equação 1[4]:

$$f_{HE_{11\delta}} = \frac{6.324c}{2\pi a \sqrt{\epsilon' + 2}} \left[ 0.27 + 0.36 \left( \frac{a}{2h} \right) + 0.02 \left( \frac{a}{2h} \right)^2 \right] \quad (1)$$

### C. Materiais Cerâmicos

As cerâmicas são um composto sólido formado pela ação de calor ou de calor e pressão, tendo em sua estrutura a presença de pelo menos dois elementos químicos diferentes, um destes elementos é um não metal e o outro, pode ser um metal ou mesmo não metal [10]. A possibilidade de realizar modificações em sua estrutura tornou vantajosa a sua utilização, pois permitem o desenvolvimento de novos materiais com propriedades direcionadas a aplicação desejada, tais como magnetismo, luminescência, etc. Além disso, apresentam maior resistência à temperatura, boas propriedades mecânicas, propriedades elétricas especiais, maior estabilidade química, dentre outras [11].

As cerâmicas dielétricas são muito atrativas para o uso na indústria de telecomunicações, em especial para aplicação em dispositivos eletroeletrônicos. Sua importância se deve ao fato de que permitem a miniaturização de componentes eletroeletrônicos e apresentarem altas permissividades dielétricas. Essas vantagens apresentadas contribuem para a evolução dos sistemas de comunicação em micro-ondas e RF [1].

### D. Alumina e Óxido de Titânio

A Alumina ( $Al_2O_3$ ) e o óxido de Titânio foram elementos escolhidos para o desenvolvimento deste trabalho por apresentarem boas propriedades físicas na faixa de RF e Micro-ondas. Como material cerâmico a alumina ( $Al_2O_3$ ) surgiu comercialmente em 1907. Suas propriedades de interesse são permissividade relativa ( $\epsilon_r = 10$ ), baixa perda dielétrica ( $\tan \delta = 1,0 \times 10^{-5}$ ) e coeficiente de temperatura de frequência ressonante ( $\tau_f = -60 \text{ ppm } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) [1]. Entretanto, sua desvantagem ocorre na fabricação, pois é necessário uma

temperatura de sinterização elevada, com um ponto de fusão em torno de  $2050^\circ\text{C}$ , isso para se obter uma cerâmica de alumina com alta densidade e baixa porosidade, pois sem esses requisitos torna-se inviável sua utilização para aplicações em faixa de micro-ondas, porque materiais cerâmicos com elevada porosidade alteram consideravelmente as propriedades dielétricas [1].

A escolha pelo óxido de titânio é devido ao fato de que esse elemento pode atuar como um fundente na matriz cerâmica de alumina, agindo como um bom agente de sinterização, apresentando permissividade relativa ( $\epsilon_r = 100$ ), e coeficiente de temperatura ressonante ( $\tau_f = 450 \text{ ppm } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), propriedades que colaboram para sua utilização em engenharia de telecomunicações, especialmente como antenas ressoadoras dielétricas [1].

Na fabricação das peças foram adicionadas a matriz cerâmica de ( $Al_2O_3$ ) as seguintes concentrações em massa de  $TiO_2$ : 2,5%, 5%, 7,5% e 10%, visando como citado anteriormente a diminuição da temperatura de sinterização e posteriormente a melhora nas propriedades dielétricas do material, podendo desta forma melhor avaliar sua aplicação como ARD.

## III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O arranjo experimental para as medidas do ressoador cilíndrico (RC) atuando como uma antena pode ser visto na Figura 1, para esse tipo de configuração utiliza-se uma sonda coaxial para alimentar o ressoador cilíndrico, onde está localizada no centro de uma placa de cobre (plano terra) cuja a extremidade inferior é um conector do tipo sma. A mesma configuração da Figura 1 é projetada em um ambiente computacional, obedecendo os mesmos parâmetros de medição e configuração. Os resultados experimentais foram comparados com simulações numéricas realizadas no software *High Frequency Structural Simulator* (HFSS®) da Ansoft, a fim de validar os valores experimentais que podem ser observados na Tabela 1, onde são exibidos os dados das medições para todas as ARDs fabricadas (nas proporções de 2,5% a 10% de óxido de Titânio) e os resultados dos parâmetros de campo distante obtidos, como ganho e eficiência da ARD.

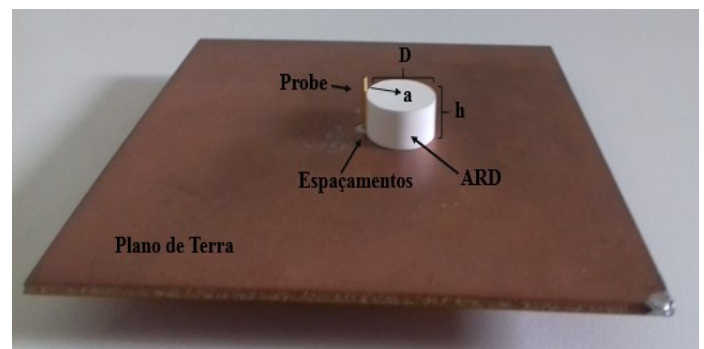


Fig.1. Arranjo experimental.

Os resultados obtidos para as ARDs testadas são mostrados na Figura 2, onde temos a perda de retorno em função da frequência de ressonância. Os gráficos exibidos tratam do comportamento dos coeficientes de reflexão ou perda de retorno ( $S_{11}$  (dB)) em função da frequência de todas as amostras. Nota-se que todas amostras testadas estão dentro da faixa de 5GHz, tendo um pequeno deslocamento conforme aumenta-se concentrações de  $TiO_2$  definidas, além é claro de

sofrer um estreitamento de banda e pequenas variações no valor da perda de retorno, esse comportamento tem forte influência das propriedades dielétricas dos materiais escolhidos para confecção das amostras e resultantes das medições.

Pode-se notar que a frequência no modo HE<sub>11δ</sub> diminui com a adição de TiO<sub>2</sub>, isto se deve ao aumento da permissividade dielétrica promovida pela adição do TiO<sub>2</sub>.

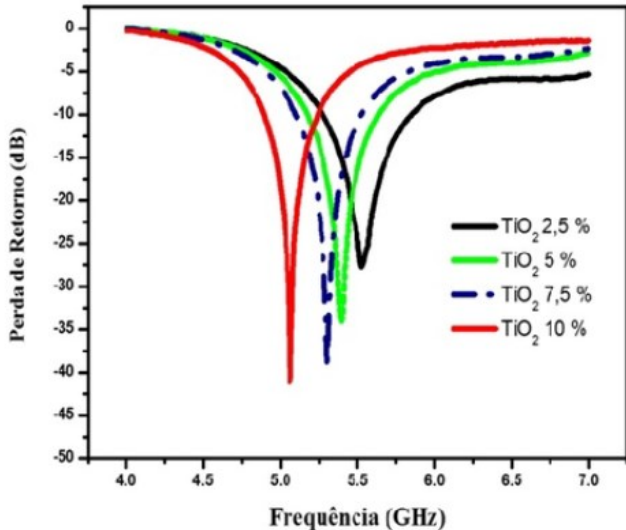


Fig.2. Perda de retorno para as ARD's das amostras de 2.5%, 5.0%, 7.5% e 10% de TiO<sub>2</sub>.

Os valores de perda de retorno obtidos indicam a razão do quanto de energia fornecida para o ressoador é devolvida ao analisador de rede devido ao casamento de impedância entre a antena e a alimentação. Valores de perda de retorno próximos de 0 (zero) dB indicam que toda energia é devolvida à fonte e que o casamento de impedância está muito ruim, valores que mostram um bom casamento de impedância para aplicações práticas estão em torno de -10dB.

Os valores obtidos neste trabalho demonstram que os ressoadores estão operando de forma satisfatória como uma antena, uma vez que as perdas de retorno obtidas nos testes assumem valores em torno de -27,7dB até -40dB, tendo, portanto, para todas as amostras valores de perdas de retorno abaixo de -10 dB o que já justifica sua aplicação como ARD (ver Tabela I). Pode-se observar também no gráfico da Figura 2 que as antenas testadas estão operando na banda C (faixa que vai de 4GHz a 8GHz), geralmente utilizada nos sistemas de telecomunicações para comunicações via satélite e outros sistemas de comunicação sem fio (Wireless).

TABELA I. PARÂMETROS DE ANTENA PARA AS COMPOSIÇÕES DE TiO<sub>2</sub>.

| Parâmetros              | 2,5%                  | 5,0%                  | 7,5%                  | 10%                    |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| D(mm)                   | 14,72                 | 14,71                 | 14,86                 | 14,86                  |
| h(mm)                   | 7,07                  | 6,70                  | 6,56                  | 6,44                   |
| ε <sub>r</sub>          | 9,19                  | 10,15                 | 10,99                 | 12,68                  |
| tg δ(10 <sup>-3</sup> ) | 1,10x10 <sup>-3</sup> | 1,02x10 <sup>-3</sup> | 9,15x10 <sup>-4</sup> | 8,23 x10 <sup>-4</sup> |
| f <sub>HEM11δ</sub>     | 5,53                  | 5,4                   | 5,44                  | 5,06                   |
| S <sub>11</sub> (dB)    | -27,7                 | -34                   | -38,8                 | -41,3                  |
| Ganho (dBi)             | 3,23                  | 3,26                  | 3,76                  | 3,35                   |
| Eficiência (%)          | 99,07                 | 98,97                 | 98,87                 | 98,91                  |

D = diâmetro do ressoador; h = altura do ressoador; tg δ = perda dielétrica.

Os parâmetros de campo distante das antenas testadas obtidas via simulações numéricas no software HFSS mostram que a adição de TiO<sub>2</sub> promoveu um aumento no ganho da ARD, sendo o maior valor de ganho o da amostra com concentração de 7,5% de TiO<sub>2</sub> com ganho de 3,76 dBi. Todas as antenas testadas mostraram através da simulação numérica eficiências acima de 95% com pouca variação entre elas.

As propriedades dielétricas obtidas na faixa de micro-ondas demonstram que adição de TiO<sub>2</sub> faz com que a permissividade dielétrica aumente e a perda dielétrica diminua devido a melhor densificação a maiores concentrações de TiO<sub>2</sub>.

Para assegurar que os dados obtidos via simulação numérica fossem os mais próximos a realidade, foram comparadas as impedâncias das antenas experimentalmente com as obtidas via simulação numérica. Os gráficos ilustrados nas Figuras 3 e 4 mostram as impedâncias da parte real e imaginária, respectivamente, e denotam o quão próximo a simulação numérica ficou dos testes experimentais. No gráfico da Figura 3 temos a demonstração da parte real de impedância da antena em função da frequência.

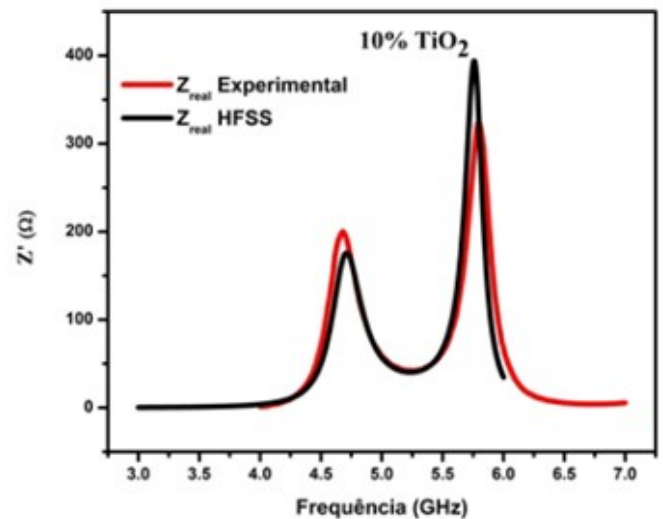


Fig. 3. Parte real da Impedância (simulada e experimental) da amostra de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 10% TiO<sub>2</sub>.

Na Figura 4 são exibidos os resultados da parte imaginária de impedância da antena em função da frequência.

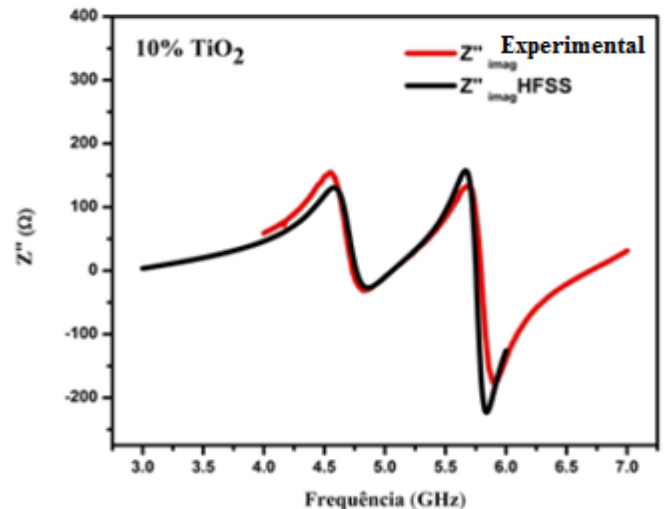


Fig. 4. Parte imaginária da Impedância (simulada e experimental) da amostra Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 10% TiO<sub>2</sub>.

Analisando o gráfico da Figura 4 nota-se que há uma boa concordância entre os resultados experimentais e simulados.

Na Figura 5 são exibidos os resultados numéricos obtidos para a carta de Smith, está ferramenta é largamente utilizada para obtenção das impedâncias, a partir da observação do comportamento das circunferências de resistência e reatância, conseguimos fazer uma melhor leitura das respostas para os valores de impedâncias e reatâncias.

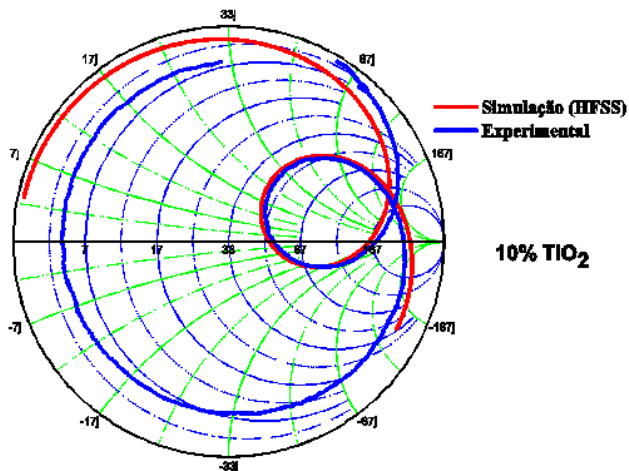


Fig. 5. Carta de Smith da amostra Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-10% TiO<sub>2</sub>.

Pode-se verificar que as curvas apresentadas no gráfico da Figura 5 tendem mais para o eixo positivo, o que reforça um comportamento mais indutivo para a ARD analisada, sendo, portanto, as resistências positivas.

Nota-se também no gráfico da Figura 5 que ocorreu poucas diferenças entre os resultados experimentais e simulados para o parâmetro em questão.

Ressaltamos que os resultados mostrados nas Figura 3, 4 e 5 são para a amostra fabricada com adição de 10% de TiO<sub>2</sub>, porém, enfatizamos que o mesmo grau de similaridade entre os resultados experimentais e simulados foram observados para as demais peças fabricadas (A respostas para as medidas das perdas de retorno podem ser vistas na Figura 2) para atuarem como antenas ressoadoras dielétricas, assim como os parâmetros de campo distante podem ser vistos na Tabela 1.

Para dar maior confiabilidade ao comportamento da amostra desenvolvida (ARD), na Figura 6 ilustramos um dos principais parâmetros de antenas, que é o diagrama de radiação.

A partir da análise da Figura 6, que representa o Diagrama de Radiação foram coletadas as informações necessárias para calcular os valores de ganho e eficiência da antena com 10% TiO<sub>2</sub>, com o auxílio do Software HFSS, o mesmo perfil foi identificado para todas as outras amostras fabricadas, isto é, todas as amostras testadas seguiram o mesmo padrão de resposta para as características estudadas.

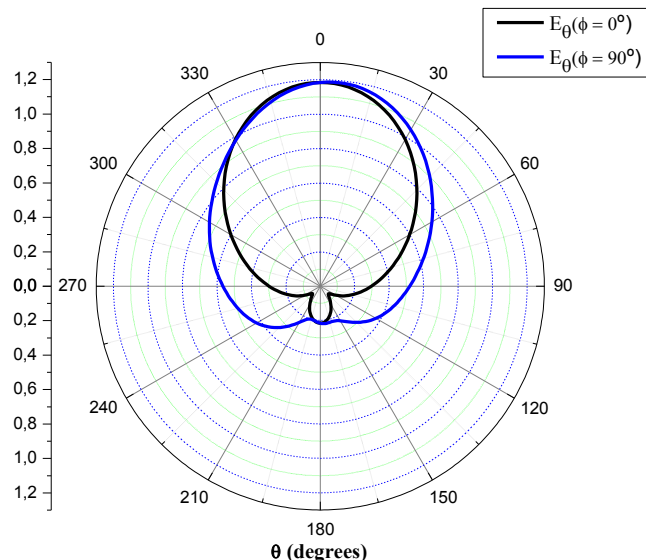


Fig. 6. Diagrama de radiação da amostra com maior percentagem de Óxido de Titânio (10%).

Ainda no diagrama de radiação, vale ressaltar que para o seu comportamento o máximo de radiação se encontra nos ângulos φ=Θ= 0°.

#### IV. CONCLUSÕES

A adição de TiO<sub>2</sub> promoveu à matriz de alumina uma diminuição na temperatura de sinterização saindo de 2050 °C para 1350 °C, proporcionando uma redução nos custos e no tempo de fabricação das amostras. Além disso, houve uma melhora na densidade dos compósitos, esse aumento na densidade contribuiu para o aumento no valor da permissividade dielétrica. Na faixa de micro-ondas os valores da permissividade dielétrica 9,19 e 12,68 e sua tangente de perda se mantiveram na ordem de 10<sup>-4</sup>. A partir dos resultados apresentados, seja para as boas propriedades dielétricas resultantes da composição do material ou mesmo para sua coerência quanto aos parâmetros medidos, concluímos que a ARD desenvolvida apresentou um elevado potencial para ser utilizada nos sistemas de comunicações atuais. Pelos resultados dos testes, a ARD projetada pode ser bem aceita em dispositivos que operam na Banda C, faixa geralmente utilizada para sistemas de comunicações via satélite. Nossa conclusão tem como base os valores para a frequência de ressonância obtidos, que foram na faixa de 5 GHz. Portanto, acreditamos no potencial da amostra desenvolvida, com boas perspectivas de que ela venha ser útil para a aplicação em dispositivos de telecomunicações.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET), e ao LOCEM-UFC.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. T. Sebastian, *Dielectric Materials for Wireless Communication*. Elsevier Science, 2010.
- [2] A. Petosa, *Dielectric Resonator Antenna Handbook*. Artech House, 2007.
- [3] A. Petosa and A. Ittipiboon, “Dielectric Resonator Antennas: A Historical Review and the Current State of the Art,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 91–116, Oct. 2010.
- [4] K. M. Luk and K. W. Leung, *Dielectric Resonator Antennas*. Research Studies Press, 2003.
- [5] B. W. Hakki and P. D. Coleman, “A Dielectric Resonator Method of Measuring Inductive Capacities in the Millimeter Range,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 8, no. 4, pp. 402–410, Jul. 1960.
- [6] W. E. Courtney, “Analysis and Evaluation of a Method of Measuring the Complex Permittivity and Permeability Microwave Insulators,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 18, no. 8, pp. 476–485, Aug. 1970.
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, 2012.
- [8] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. Wiley India, 2012.
- [9] S. Long and M. McAllister, “The resonant cylindrical dielectric cavity antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 31, no. 3, pp. 406–412, May 1983.
- [10] A. J. Moulson and J. M. Herbert, *Electroceramics: Materials, Properties, Applications*. Wiley, 2003.
- [11] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9th Edition: Ninth Edition, 9th ed. 2013.