

Estudo de Antenas Ressonadoras Dielétricas Baseadas em FeNbTiO_6 $(\text{ZnO})_X$ para Aplicação em Dispositivos de Microondas

J. E. V. de Morais, A. J. C. Neves, M. A. S. Silva, D. B. da Costa, D. G. Sousa, J. Chaves e A. S. B. Sombra

Resumo—Neste trabalho é realizado um estudo de antenas ressoadoras dielétricas (DRA) da matriz cerâmica FeNbTiO_6 (FNTO). Para tal, as amostras são adicionadas com ZnO nas seguintes proporções 0%, 8%, 16% e 25%. As propriedades dielétricas de micro-ondas apresentaram permissividade entre 47,23 e 63,77, além de um aumento das perdas dielétricas. Observou-se também através dos resultados que o coeficiente de temperatura da frequência ressonante (τ_f) decresceu a medida que a concentração de ZnO aumentou, tendendo a uma maior estabilidade térmica. Além disso, resultados de simulação para a perda de retorno e diagramas de radiação mostraram que as amostras funcionam de forma eficiente como DRA na faixa de 2,2 GHz a 2,6 GHz. Com a melhora das propriedades dielétricas devido a adição de ZnO, o trabalho com um maior número de aplicações em dispositivos de micro-ondas, especificamente DRA, torna-se viável.

Palavras-Chave—DRA, FNTO, permissividade, diagrama de radiação, perda de retorno.

Abstract—In this paper, a study of dielectric ressoadoras antennas (DRA) of FeNbTiO_6 ceramic matrix (FNTO) is carried out. Samples are added with ZnO in the following proportions 0%, 8%, 16% and 25%. The microwave dielectric properties exhibited permittivity between 47.23 and 63.77, in addition to an increase in dielectric loss. Also, it is shown that the temperature coefficient of frequency resonator (τ_f) decreased, improving the thermal stability. Simulation results for the return loss and radiation patterns showed that the samples operate efficiently as DRA in the 2.2GHz to 2.6 GHz band. The increased permittivity allows a large number of applications in microwave devices, specifically DRA.

Keywords—DRA, FNTO, permittivity, radiation pattern, return loss.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, devido ao grande avanço tecnológico dos sistemas de micro-ondas, novos materiais e novas técnicas foram desenvolvidos para serem aplicados nas mais diversas áreas do setor industrial e de telecomunicações, provendo assim dispositivos com melhores desempenhos e mais eficientes. Concomitantemente com esta demanda por novos materiais,

J. E. V. de Morais, A. J. C. Neves e D. G. Sousa, Laboratório de Telecomunicações, Ciências e Engenharia de Materiais (LOCEM); Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza-CE, Brasil, Emails: eduardoasconc@gmail.com, armando-castro@bol.com.br, djfisica@gmail.com

D. B. da Costa, Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem Fio (GTEL), UFC, Fortaleza-CE, Brasil, Email: danielbcosta@ieee.org

M. A. S. Silva e J. Chaves, LOCEM, UFC, Fortaleza-CE, Brasil, Emails: marceloassilva@yahoo.com.br, juscelinochaves@hotmail.com

A. S. B. Sombra, LOCEM; Departamento de Física, UFC, Fortaleza-CE,, Brasil, Email: asbsombra@gmail.com

os materiais cerâmicos ocupam um lugar de destaque nas telecomunicações, pois tais materiais apresentam características elétricas e dielétricas interessantes na faixa de frequência desejável, como alta permissividade dielétrica e boa perda dielétrica, baixo consumo de energia, alto desempenho, boa estabilidade térmica e a possibilidade de miniaturização dos circuitos [1]. Dessa forma, as vantagens encontradas com o uso de materiais cerâmicos levou a uma revolução na tecnologia das comunicações sem fio na faixa de micro-ondas. Estas características garantem que os sistemas de comunicação operem adequadamente em frequências bem definidas e possam ocupar um menor volume. As antenas são indispensáveis para a transmissão e recepção das ondas eletromagnéticas, e deve-se conhecer todas as suas características e finalidades para adequá-las ao mercado, atendendo assim às necessidades específicas de cada setor tecnológico.

Um dispositivo muito estudado é a antena ressoadora dielétrica (DRA) porque ela se adequa às rigorosas exigências dos equipamentos sem fio, possuem baixo perfil, pequeno tamanho e uma alta eficiência [4]. Um estudo de DRA aplicado em micro-ondas (300 MHz-30GHz) foi apresentado em [5]. O estudo dos ressoadores dielétricos (DRs) como elementos de antena começou na década de 1980 em [6], nos quais as principais formas geométricas são utilizadas até os dias atuais, como ilustrado na Fig. 1. Das geometrias estudadas, a cilíndrica oferece maiores configurações [7]. Contudo, as perdas dielétricas geralmente aumentam com o aumento da permissividade (ϵ'_r). Em [8], estudou-se a caracterização estrutural, superficial, e dielétrica em radiofrequência e micro-ondas, assim como a simulação de antenas de FeNbTiO_6 (FNTO) pura e com adição de Bi_2O_3 .

A adição de fundentes em uma cerâmica promove uma redução na temperatura de sinterização, tornando possível a produção de uma determinada cerâmica. Entretanto, se este fundente não for removido no processo de sinterização (por volatilização ou queima) ele pode promover mudanças de propriedades dielétricas da cerâmica. O óxido de zinco (ZnO) é comumente utilizado como agente sinterizante e neste trabalho adicionou-se ZnO para melhorar a densidade relativa da cerâmica e observar seu efeito nas propriedades dielétricas do FNTO como permissividade dielétrica, perda dielétrica e τ_f . As composições utilizadas neste trabalho foram de 0%, 8%, 16% e 25% em massa de ZnO e a caracterização dielétrica foi realizada nas regiões de radiofrequência e micro-ondas, bem como a simulação de antenas com o FeNbTiO_6 .



Fig. 1. Diferentes geometrias para os DRs.

II. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O FTNO foi obtido via método cerâmico com a mistura dos óxidos de ferro, nióbio e titânio em quantidades estequiométricas e submetida a um processo de calcinação a 1125 °C por 6h. Após a obtenção do FTNO foram fabricados cilindros cerâmicos com adição de ZnO nas concentrações em massa de 6%, 18% e 25%. A caracterização dielétrica destes cilindros cerâmicos na região de microondas foi através do método Hakki-Coleman e o estudo destas propriedades com o efeito da temperatura através do método Silva-Fernandes-Sombra (SFS) [9]. Os modos eletromagnéticos estudados na região de microondas foram o modo TE₀₁₁ e o HE_{11δ}. A densidade destas cerâmicas foi analisada por picnometria para se averiguar o caráter sinterizante do ZnO. Um estudo do comportamento destes ressoadores dielétricos como antena foi realizado através de uma alimentação com uma sonda coaxial na lateral do cilindro e os resultados de campos distante foram obtidos via simulação numérica através do software HFSS.

Os resultados obtidos através da picnometria irão mostrar que a adição de ZnO melhora a densidade relativa da cerâmica. As densidades relativas foram obtidas através da relação da densidade obtida experimentalmente e da densidade obtida através do cálculo das densidades dos monocristais das fases de FTNO e ZnO, este cálculo foi realizado através da equação 1.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Picnometria

A picnometria foi a técnica utilizada para obter os valores de densidades com boa precisão. Para comprovar o efeito no processo de sinterização foi utilizada como referencial as densidades dos monocristais do FTNO (ρ_{FTNO}) e do ZnO (ρ_{ZnO}), com a densidade final teórica sendo calculada como segue

$$\rho = \frac{100}{\frac{\%ZnO}{\rho_{ZnO}} + \frac{\%FTNO}{\rho_{FTNO}}} \quad (1)$$

Com a picnometria o processo de sinterização realizado foi efetivo, pois conforme a tabela 1 houve um aumento das densidades.

As densidades experimentais medidas mostram-se em uma crescente com a adição de ZnO, pois este atua como agente de sinterização na temperatura em que os materiais foram sintetizados. A exceção para este comportamento é observada para a amostra de 8%, conforme a Tab. 1.

Com o aumento das densificações observadas após a adição de ZnO, espera-se uma melhora nas propriedades dielétricas do material, já que algumas destas propriedades são influenciadas pela densificação do material, principalmente a permissividade, pois quanto mais denso a amostra, menor o grau de porosidade interno e consequentemente maior será a permissividade.

| %ZnO | $\rho_{teorico}$ | $\rho_{experimental}$ | $\rho_{relativo}$ |
|------|------------------|-----------------------|-------------------|
| 0 | 4,948 | 4,41 | 0,891 |
| 8 | 5,00 | 4,447 | 0,889 |
| 16 | 5,06 | 4,598 | 0,909 |
| 25 | 5,12 | 4,666 | 0,911 |

TABELA I

DENSIDADES DAS CERÂMICAS DE FTNO ADICIONADAS DE ZNO.

B. Radiofrequência

As figuras 2 e 3 apresentam as medidas experimentais das propriedades dielétricas do FTNO com a adição de 8% e 25% de ZnO em massa. Conforme observado na Fig. 3, a medida que a frequência aumenta, todas as amostras apresentam um comportamento de queda com respeito a permissividade. A Tab. 2 mostra estes valores e o comportamento da permissividade e das perdas dielétricas para o aumento da frequência. Em todas as frequências analisadas, verifica-se que o comportamento de queda da permissividade se confirma.

Estes efeitos observados podem estar associados as características dielétricas do ZnO, ou seja, devido a permissividade dielétrica e uma alta perda dielétrica do óxido de zinco, nota-se estes efeitos na região de radiofrequência. Contrário ao comportamento mostrado na faixa de radiofrequência de 1Hz a 1MHz, a adição de ZnO fez com que a permissividade dielétrica aumentasse com o aumento da concentração de óxido de zinco, fazendo prevalecer o efeito da sinterização nesta faixa de frequência estudada (100 MHz a 1GHZ).

| f(MHz) | | 0 | 8 | 25 |
|--------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 100 | ϵ_r | 15,21 | 18,40 | 30,24 |
| | Tg δ | $4,90 \times 10^{-1}$ | $4,20 \times 10^{-1}$ | $2,48 \times 10^{-1}$ |
| 250 | ϵ_r | 14,87 | 18,31 | 29,91 |
| | Tg δ | $1,21 \times 10^{-1}$ | $5,66 \times 10^{-2}$ | - |
| 500 | ϵ_r | 14,87 | 18,44 | 30,24 |
| | Tg δ | $6,56 \times 10^{-2}$ | $4,39 \times 10^{-2}$ | - |
| 750 | ϵ_r | 14,85 | 18,60 | 30,69 |
| | Tg δ | $3,23 \times 10^{-2}$ | $4,11 \times 10^{-3}$ | - |
| 1000 | ϵ_r | 14,84 | 18,87 | 31,87 |
| | Tg δ | $2,04 \times 10^{-2}$ | - | - |

TABELA II

PERMISSIVIDADE DIELÉTRICA E TANGENTE DE PERDAS DIELÉTRICA Tg (δ) EM RADIOFREQUÊNCIA.

Com respeito a perda dielétrica, mostrada na Fig. 3, o mesmo comportamento do estudo anterior é observado, ou seja, um crescimento da perda dielétrica com o aumento da concentração de ZnO, conforme Tab. 2.

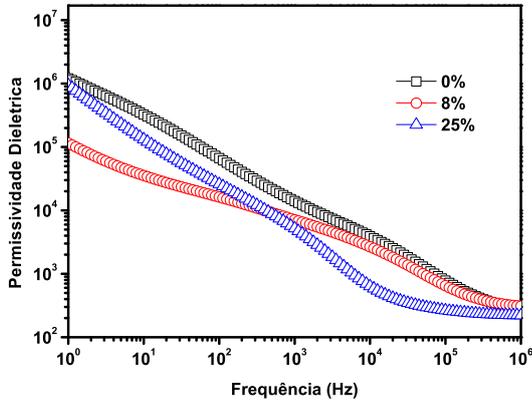


Fig. 2. Efeito do ZnO na permissividade dielétrica do FNTO.

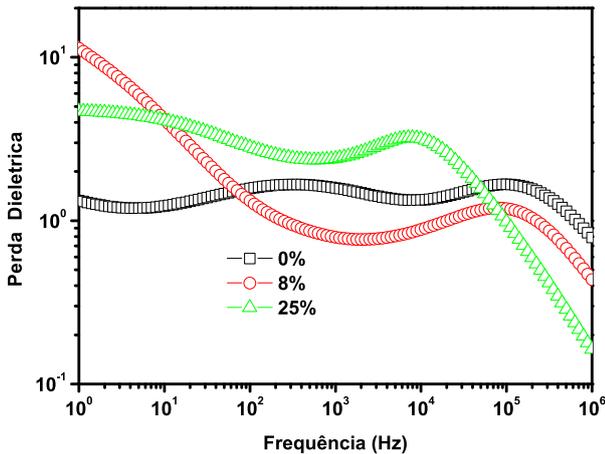


Fig. 3. Efeito da adição de ZnO na perda dielétrica do FNTO.

C. Microondas

As amostras estudadas em microondas utilizando a técnica Hakki-Coleman foram fabricadas e obtiveram dimensões que seguem a relação diâmetro-altura na proporção 2:1. Esta proporção de diâmetro e altura serviu para facilitar a identificação do modo TE011 para caracterização dielétrica da matriz FeNbTiO₆ na região de microondas. A permissividade dielétrica encontrada para o FNTO foi de 47,25 com perda dielétrica no valor de 1,62 × 10⁻³. Verificou-se a influência da adição de ZnO nas propriedades dielétricas da cerâmica de FTNO na região de microondas e o efeito do crescimento da permissividade dielétrica para amostra de 8% de ZnO estar associado a melhora da densidade relativa da cerâmica. Na Fig. 2, pode-se observar que a permissividade elétrica cresce com a adição de 8% de ZnO, mas nas concentrações superiores ocorre saturação devido aos altos valores de adição de ZnO

fazendo com que a permissividade dielétrica caia ao invés de aumentar, como era previsto pelo estudo da densidade apresentado na Tab. 3.

| AMOSTRAS | ϵ'_r | Tg δ | f (GHz) |
|----------|---------------|-----------------------|---------|
| FNTOZ0 | 47,25 | 1,62x10 ⁻³ | 3,68 |
| FNTOZ08 | 48,52 | 9,48x10 ⁻⁴ | 3,51 |
| FNTOZ16 | 46,37 | 1,13x10 ⁻³ | 3,69 |
| FNTOZ25 | 34,96 | 1,95x10 ⁻³ | 4,10 |

TABELA III
MEDIDAS DIELÉTRICAS (ϵ'_r E Tg δ) NA REGIÃO DE MICROONDAS.

D. Coeficiente de Temperatura (τ_f)

Uma análise do τ_f das cerâmicas de FNTO adicionadas de ZnO também foi realizada no estudo dielétrico em microondas. A ideia básica é observar como se comporta o τ_f do FNTO com a adição de óxido de zinco, isto é, se o valor aumenta ou diminui. Ao medir os valores de τ_f na adição de 8% e 16% de ZnO, observou-se uma tendência de diminuir o valor do τ_f de 270 ppm°C⁻¹, na adição de 8%, para 96 ppm°C⁻¹, na composição de 16%. Já na composição de 25%, houve um inesperado aumento do valor de 8%, sendo superior até mesmo do valor do FNTO puro, como mostrado na Tab. 4.

| Amostra | τ_f (ppm/°C) |
|---------|-------------------|
| FNTO | 281,1 |
| FNTO8 | 120,3 |
| FNTO16 | 99 |
| FNTO25 | 327,5 |

TABELA IV
MEDIDAS DE τ_f PARA AS AMOSTRAS DE FTNO ADICIONADAS DE ZNO.

Este estudo sugere que possa haver uma composição nominal entre 16% e 25% no qual se encontre uma cerâmica que apresente valor de τ_f igual a zero para melhorar a estabilidade térmica do material. Para este estudo, há uma necessidade de uma variedade de composições de ZnO entre estas duas porcentagens e verificar o comportamento.

E. Antenas

A análise dos ressoadores dielétricos fabricados como uma antena são mostrados nas medidas de perda de retorno das cerâmicas analisadas. As figuras 4, 5 e 6 mostram as perdas de retorno para as amostras adicionadas de ZnO, onde observa-se que todas apresentam perdas de retorno abaixo de -10dB,

que é a característica fundamental para se comprovar que uma antena está realmente funcionando.

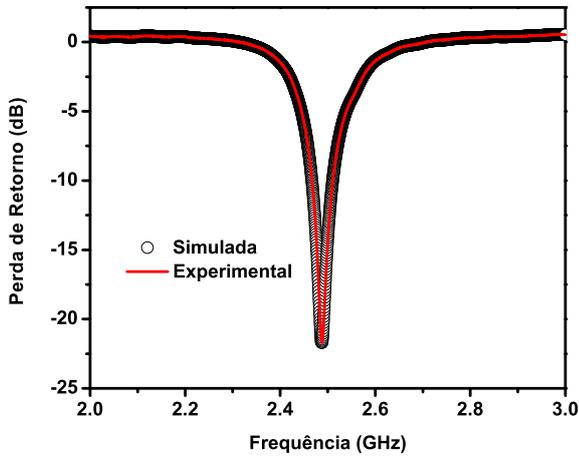


Fig. 4. Perda de retorno para uma DRA de FNT0 adicionada de 8% de ZnO.

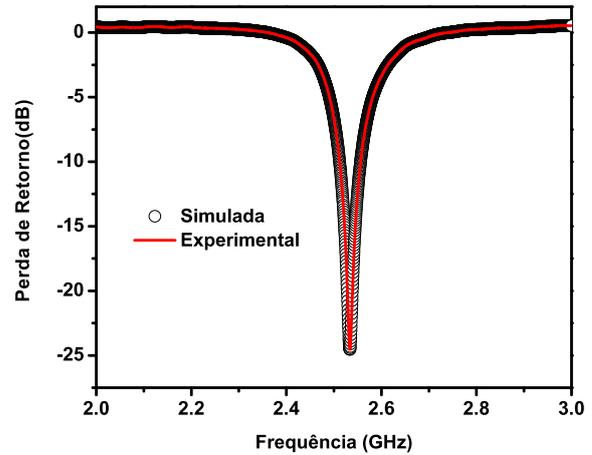


Fig. 6. Perda de retorno para uma DRA de FNT0 adicionada de 25% de ZnO.

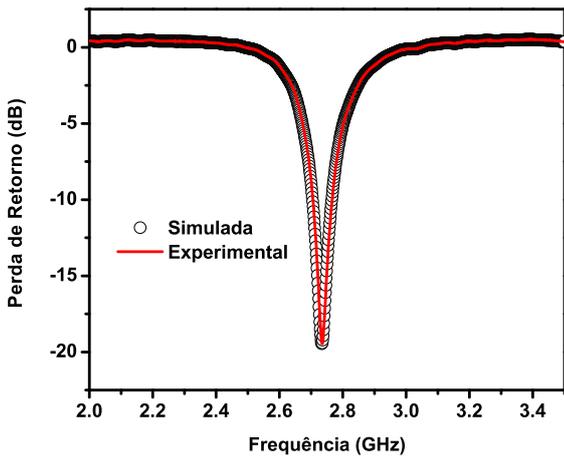


Fig. 5. Perda de retorno para uma DRA de FNT0 adicionada de 16% de ZnO.

Também é possível observar que existe uma variação da frequência de operação que está associada com a variação da permissividade e das dimensões das cerâmicas (efeito da densificação do ZnO).

Os parâmetros de campo distante foram obtidos mediante simulação numérica desta DRA no software HFSS, onde depois de convergir os resultados simulados para os resultados experimentais, os parâmetros como ganho, eficiência e diagrama de radiação foram estimados. Através dos resultados obtidos, mostrado na Tab. 5, pode-se constatar que os ganhos de todas as antenas apresentaram valores acima de 3 dBi, com o maior valor sendo para a composição de 8%. A eficiência mostrou valores acima de 90% para todas DRA medidas e novamente com a melhor eficiência para a composição de 8% de ZnO. O fato da DRA de 8% de ZnO apresentar os melhores resultados de campo distante pode estar associado a esta DRA apresentar a maior permissividade e menor perda dielétrica.

| % ZnO | Ganho | Eficiência | Diretividade |
|-------|-------|------------|--------------|
| 8% | 3,17 | 96,69 | 3,27 |
| 16% | 3,09 | 96,37 | 3,21 |
| 25% | 3,17 | 94,76 | 3,34 |

TABELA V
PARÂMETROS DE ANTENAS OBTIDOS POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA.

Nas Figs. 7, 8 e 9 são mostradas o perfil de radiação de todas as antenas testadas. O máximo de radiação das antenas acontece quando $\theta = 0$. O perfil de radiação está concordante com o perfil de uma DRA cilíndrica.

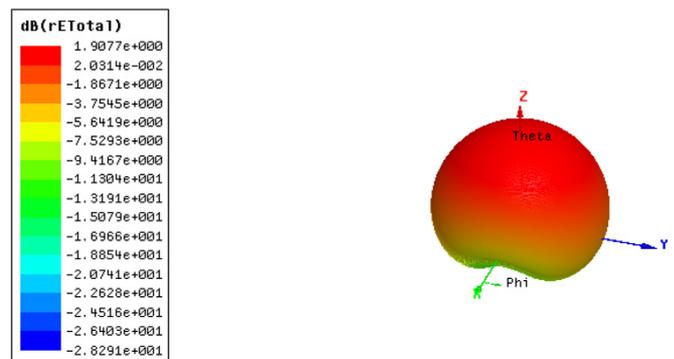


Fig. 7. Diagrama de Radiação para uma DRA de FNT0 adicionada de 8% de ZnO.

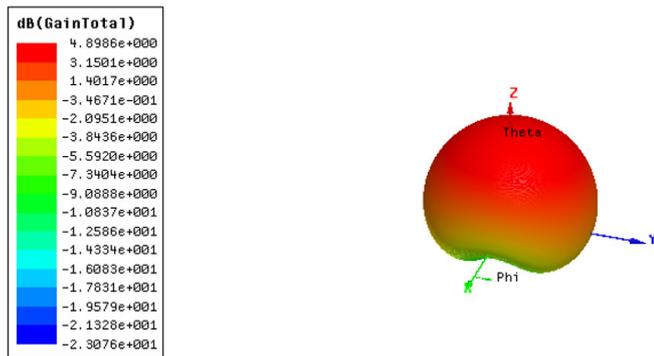


Fig. 8. Diagrama de Radiação para uma DRA de FNT0 adicionada de 16% de ZnO.

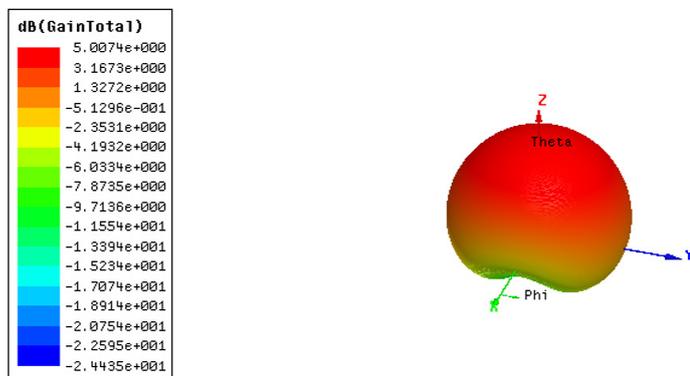


Fig. 9. Diagrama de Radiação para uma DRA de FNT0 adicionada de 25% de ZnO.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo dielétrico do FNT0 com adição de ZnO nas proporções 0%, 8%, 16% e 25%. Mostrou-se que apresenta altas permissividades abaixo de 1kHz, com valores acima de 10^4 , e perdas dielétricas elevadas. Para a faixa de frequência de 1MHz a 1GHz, a permissividade apresentou valores na faixa de 20 a 60 com perdas dielétricas baixas. Os ressoadores dielétricos apresentaram comportamento de antena, apresentando perdas de retorno abaixo de -10 dB.

REFERÊNCIAS

- [1] A. J. Moulson e J. M. Herbert, *Electroceramics - Materials, Properties, Applications*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2003
- [2] A. B. Constantine, *Antena Theory Analysis and Design*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2005.
- [3] Y. Xu, *Ferroelectric Materials and Their Applications* (Elsevier, Amsterdam, 1991).
- [4] A. Petosa, *Dielectric Resonator Antenna Handbook*, Norwood: Artech House, 2007.
- [5] W. D. Callister Jr., *Ciência e Engenharia de Materiais - uma Introdução*, Oitava Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [6] D. Kajfez e P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Washington: Artech House, Inc., 1986.
- [7] K.-W. Leung e K. W. Luk, *Dielectric Resonator Antennas*, Baldock, Inglaterra: Research Studies Press, Ltd., 2003.
- [8] D. G. Sousa, G. D. Saraiva, J. M. S. Filho e A. S. B. Sombra, *Dielectric and microwave properties study of FeNbTiO₆ ceramics added Bi₂O₃*. J Mater Sci: Mater Electron (2014)25:4450-4457.

- [9] M. A. S. Silva, T. S. M. Fernandes, and A. S. B. Sombra, *An alternative method for the measurement of the microwave temperature coefficient of resonant frequency(τ_f)*. J. Appl. Phys., vol. 112, n. 7, p. 074106, 2012.