

Estudo das propriedades dielétricas em microondas da cerâmica BNO (BiNbO_4) com adição de ZnO

Antonio Jefferson Manguiera Sales, Ronaldo Cristino Mariano, Bruno Sousa Araújo, Mairton Cavalcante Romeu, Antonio Sérgio Bezerra Sombra.

Resumo— O objetivo deste trabalho é estudar as propriedades dielétricas em microondas do composto BiNbO_4 (BNO) com adição de ZnO e discutir a influência de tal adição tendo em vista possíveis aplicações em ressoadores dielétricos. A cerâmica BNO foi produzida pelo método padrão do estado sólido. O ZnO (3, 5 e 10% em massa) foi adicionado com a finalidade de se estudar as alterações nas propriedades dielétricas dos “bulks” cerâmicos produzidos. Álcool polivinílico (PVA) foi também incorporado ao processo de fabricação como aglutinante orgânico. As amostras foram caracterizadas através de Difratometria de Raios-X (DRX) e um estudo das propriedades dielétricas usando a técnica de Hakki-Coleman foi feito. O Refinamento de Rietveld indicou que o BNO puro produzido, apresenta uma estrutura do tipo ortorrômbica (grupo espacial: $Pnna52$). As propriedades dielétricas: constante dielétrica (ϵ'), fator de perda dielétrica ($tg\delta$) e fator de qualidade (Qu), foram medidas à temperatura ambiente. A presença do fundente ZnO mais aglutinante PVA em todas as concentrações estudadas alterou as propriedades dielétricas das amostras quando comparado com a amostra padrão (BNO puro).

Palavras-Chave: BiNbO_4 ; reação de estado sólido ; ressoadores dielétricos.

Abstract— The objective of this work is to study the microwave dielectric properties of the compound BiNbO_4 (BNO) with addition of ZnO and discuss the influence of the additions in view of possible applications in dielectric resonators. The BNO ceramic has been produced by the standard method of solid state. The ZnO (3, 5 and 10% by weight) was added in order to analyze the changes in the dielectric properties of ceramic bulks produced. Polyvinyl alcohol (PVA) was also incorporated into the manufacturing process as organic binder. The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD) and a study of dielectric properties using the technique of Hakki Coleman was done. The Rietveld refinement indicated that the pure BNO produced, has an orthorhombic type structure (space group: $Pnna52$). The dielectric properties: dielectric constant (ϵ'), dielectric loss factor ($tg\delta$) and quality factor (Qu), were measured ambient temperature. The presence of ZnO more melting PVA binder in all concentrations change the dielectric properties of the samples compared to the standard sample (BNO pure).

Keywords: BiNbO_4 ; solid state reaction ; dielectric resonators.

I. INTRODUÇÃO

Do crescente desenvolvimento da indústria de telecomunicações comerciais até os mais modernos sistemas militares, são exigidos incessantes estudos para o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos passivos de miniaturização, alto desempenho eletromagnético, confiabilidade e baixo custo. Muitos materiais para rádio-

frequência e microondas têm sido amplamente usados em uma variedade de aplicações nestes segmentos. O estudo das propriedades destes materiais e o desenvolvimento de novos materiais com características específicas têm sido objeto de pesquisas em física do estado sólido, engenharia de materiais e engenharia elétrica ou eletrônica.

Cerâmicas dielétricas a base de Bismuto são candidatas como materiais de baixa temperatura de sinterização (low-firing temperature) e tem sido estudadas em aplicações como materiais piezoelétricos e em capacitores cerâmicos [1]. Para baixar a temperatura de sinterização das cerâmicas dielétricas, usam-se comumente algum dos três métodos a seguir: Adição de óxidos; tratamento químico; ou utilização de materiais de partículas de tamanho reduzido. O primeiro método é o mais praticado e será utilizado e discutido neste trabalho.

Estudos anteriores de investigação da estrutura revelam que a baixa temperatura, o BNO apresenta estrutura Ortorrômbica, tendo a partir 1020°C uma mudança de fase para Triclínica.[2]

A temperatura de mudança de fase, e parâmetros como fator de perda dielétrica, constante dielétrica, fator de qualidade e coeficientes de temperatura de frequência de ressonância, além da citada densificação, podem ser alterados pelo uso de fundentes. [3]

Neste trabalho, nosso objetivo é estudar as propriedades de uma série do material BiNbO_4 adicionado com óxido de Zinco (ZnO) e discutir a influência das concentrações deste fundente e do aglutinante PVA. Técnicas experimentais foram empregadas visando estudar as propriedades estruturais e dielétricas das amostras produzidas, usando-se Difratometria de Raios-X (DRX) e Hakki-Coleman. As amostras foram investigadas com vista possíveis aplicações em ressoadores dielétricos em microondas. Nesta região do espectro eletromagnético, a miniaturização dos componentes é desejável e, neste sentido, a aplicação destes materiais já vem sendo discutida em outros trabalhos [3; 4].

II. METODOLOGIA

A. Preparação das amostras

O trabalho iniciou-se na preparação de uma série de BiNbO_4 (BNO), que foi cuidadosamente fabricada através da reação de estado sólido. A princípio, os reagentes Bi_2O_3 (Vetec, 98%) e Nb_2O_5 (Aldrich, 99,9%) foram estequiometricamente pesados. Os óxidos foram devidamente pesados, misturados e foi realizada a moagem da mistura em pó em um moinho de bolas de alta energia (moinho planetário Fritsch Pulverisette 6) por 2h a 270 rpm. A moagem é realizada com o intuito de prover maior homogeneização dos

Antonio Jefferson Manguiera Sales, Mairton Cavalcante Romeu, Antonio Sérgio Bezerra Sombra. Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, E-mail: jeffsales.brasil@gmail.com

Ronaldo Cristino Mariano, Bruno Sousa Araújo, Departamento de Física, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, E-mail: ronaldoifce@gmail.com

reagentes de partida e ativação do pó, promovendo um aumento da área superficial do material a partir da diminuição do tamanho da partícula, tornando o pó mais reativo. A composição foi então levada a fornos em cadinho de alumina e sofre calcinação com temperatura controlada (JUNG – LF0912) a 850°C durante 3h, partindo da temperatura ambiente com uma taxa de 5°C/min. A mistura foi novamente moída por 1h após a etapa de calcinação, em seguida adicionada ao fundente ZnO (Aldrich, 99%) a 0, 3, 5 10% em massa, com o propósito de aumentar a densidade das peças e diminuir a temperatura de sinterização, assim como também, estudar as mudanças nas propriedades estruturais e dielétricas das amostras cerâmicas finais a partir do comparativo das concentrações do fundente. O Álcool Polivinílico (PVA) foi adicionado (cerca de 5% em massa) como ligante para promover plasticidade ao pó cerâmico, facilitando a sua compactação e posterior retirada do molde após o processo de prensagem uniaxial (147 MPa). Os moldes formatam a mistura em pastilhas cilíndricas. Após a prensagem, as pastilhas foram ao forno para sinterização à temperatura de 1025°C por 3 h, com um degrau intermediário a 200°C por 30 min. Esse degrau intermediário existe para eliminar umidade, resultando em quase completa densificação (> 89% da densidade teórica). As amostras cerâmicas foram codificadas por BNO (sem adição), BNO3Zn (com 3% de ZnO em massa), BNO5Zn (com 5% de ZnO em massa), BNO10Zn (com 10% de ZnO em massa).

B. Difração de Raio-X

O perfil de difração de raios-X (DRX) das amostras foi obtido à temperatura ambiente (cerca de 294 K) usando um difratômetro de raios-X modelo Rigaku D/max-B, composto de um gerador de raios-X, sistema de lentes, goniômetro e detector de raios-X. As amostras foram fixadas em um suporte de silício. Os padrões foram coletados usando radiação Co-K α ($\lambda = 0.178897$ nm), com o equipamento operando em 40 kV e 25 mA (máx.) na geometria de Bragg-Brentano com um passo de 0,02° sobre uma faixa angular de 20° - 80° (2 θ). O método de Rietveld é aplicado para a determinação quantitativa de fases de espécies sinterizadas [7, 8].

C. Análise da Antena Ressonadora Dielétricas Cilíndrica

Um ressonador dielétrico pode ser representado por uma cavidade cilíndrica, com o seu volume preenchido por material dielétrico. A solução das equações de Maxwell para a propagação de ondas eletromagnéticas numa cavidade cilíndrica é simplificada considerando-se os modos de propagação de um guia de onda circular.

Linhas de transmissão que consistem de dois ou mais condutores podem suportar ondas eletromagnéticas transversais híbridas (HEM), caracterizadas pela ausência de componentes longitudinais dos campos. Ondas HEM possuem valores únicos e bem definidos para voltagem, corrente e impedância característica. Os guias de onda frequentemente consistem de um único condutor. Este tipo suporta ondas transversais elétricas (TE) e/ou ondas transversais magnéticas (TM), caracterizadas pela presença de uma componente longitudinal de campo elétrico ou magnético, respectivamente.

Antonio Jefferson Manguiera Sales, Mairton Cavalcante Romeu, Antonio Sérgio Bezerra Sombra. Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, E-mail: jeffsales.brasil@gmail.com

Ronaldo Cristino Mariano, Bruno Sousa Araújo, Departamento de Física, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, E-mail: ronaldofce@gmail.com

A definição de uma única impedância característica não é possível para tais tipos de ondas, embora definições possam ser escolhidas de modo que o conceito impedância característica possa ser usado para guias de onda com resultados significativos [7].

Os modos TE e TM podem ser entendidos como aqueles modos cuja componente de campo elétrico e magnético, respectivamente, em um dado eixo é nula. O modo HEM com relação a um eixo de propagação é um modo híbrido que possui os campos elétrico e magnético transversais ao eixo de propagação. Geralmente, os modos que são utilizados para aplicações em que o ressonador é o elemento radiante são os modos TM_{01 δ} , TE_{01 δ} e HEM_{11 δ} [8].

A geometria de uma DRA cilíndrica é apresentado na Figura 1, com raio *a*, e altura *d*. Esta geometria permite a propagação de três tipos de modos: TE e TM (em relação a *z*) e o modo híbrido (HEM), dependente de ϕ .

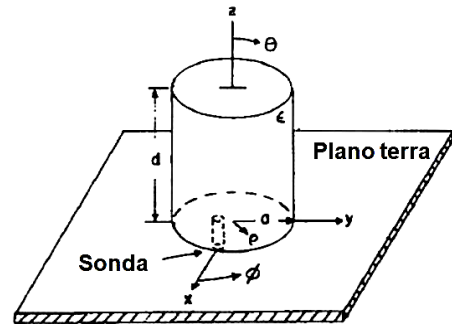


Figura 1 - DRA cilíndrico com plano de terra em $z = 0$.

Usando-se coordenadas cilíndricas e o modelo de cavidades ressonantes, e assumindo que as condições de contorno são de paredes perfeitamente magnéticas (modelo de cavidade ressonante), é possível se obter uma solução aproximada para os campos dentro do ressonador. Essa solução é dada pelas equações 1 e 2, onde podemos escrever as funções de ondas para os modos TE e TM na direção de *z*, como [9, 10]:

$$\psi_{TE_{n\phi m}} = J_n \left(\frac{X_{np}}{a} \rho \right) \left\{ \begin{matrix} \text{sen}(n\phi) \\ \cos(n\phi) \end{matrix} \right\} \text{sen} \left[\frac{(2m+1)\pi z}{2d} \right] \tag{1}$$

$$\psi_{TM_{n\phi m}} = J_n \left(\frac{X'_{np}}{a} \rho \right) \left\{ \begin{matrix} \text{sen}(n\phi) \\ \cos(n\phi) \end{matrix} \right\} \cos \left[\frac{(2m+1)\pi z}{2d} \right] \tag{2}$$

Os índices subscritos em cada modo (TE_{n ϕ m}) e (TM_{n ϕ m}) se referem às variações do campo nas direções azimutal ($n = \phi$), radial ($p = \rho$) e axial ($m = z$). J_n é a função de Bessel de ordem *n* de primeira ordem, com $J_n(X_{np}^{TE}) = 0$, $J_n(X_{np}^{TM}) = 0$, $n = 1, 2, 3, \dots$, $p = 1, 2, 3, \dots$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$. A escolha de $\text{sen}(n\phi)$ e $\cos(n\phi)$ depende da posição de alimentação.

A equação de separação é dada por:

$$k_\rho^2 + k_z^2 = \epsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 \tag{3}$$

em que k_ρ e k_z são os números de onda dentro do ressonador nas direções ρ e *z*, respectivamente, *f* é a frequência de ressonância, e *c* a velocidade da luz. Os números de onda, assumindo superfícies condutoras perfeitamente magnéticas, são:

$$k_\rho = \frac{1}{a} \left\{ \begin{matrix} X_{np}^{TE} \\ X_{np}^{TM} \end{matrix} \right\} \quad (4)$$

$$k_z = \frac{(2m+1)\pi}{2d} \quad (5)$$

A frequência de ressonância é obtida substituindo as equações 4 e 5 na equação 3:

$$f_{nmp} = \frac{1}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left\{ \begin{matrix} X_{np}^{TE^2} \\ X_{np}^{TM^2} \end{matrix} \right\} + \left[\frac{\pi a}{2d} (2m+1) \right]^2} \quad (6)$$

É observado que o ressoador dielétrico cilíndrico oferece grande flexibilidade, pois através da razão raio (*a*) e altura (*d*) do ressoador pode-se controlar a frequência de ressonância e o fator de qualidade com boa precisão, uma vez que a permissividade (ϵ) e a permeabilidade (μ) são características do próprio material em estudo.

Em termos de mecanismos de excitação das DRAs, temos: abertura, microlinha, sonda coaxial, coplanar, dentre outras. Pode-se excitar diferentes modos de ressonância, dependendo da posição da sonda. Quando o excitador é colocado no centro da DRA, o modo TM_{118} é excitado. Se posicionarmos o alimentador lateralmente, teremos a excitação do modo HEM_{118} . Esta segunda técnica é bastante utilizada, pois evita a perfuração da antena [8]. O inconveniente, neste caso, é a existência de *gaps* de ar entre a sonda e a DRA, o que pode alterar drasticamente a sua permissividade efetiva.

D. O Método Hakki-Coleman

A técnica de Hakki-Coleman [11], utilizado neste trabalho, realiza medições através de um método onde a amostra é posicionada entre duas placas de cobre (Fig. 2).

Quando as frequências produzidas pelo analisador coincidem com as frequências de ressonância naturais da amostra, sinais de microondas são transmitidos e, desta forma, a amostra passa a ser chamada de ressoador dielétrico (RD).

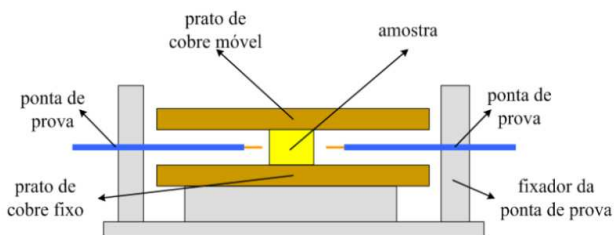


Figura 2 - Esquema do sistema de medição de propriedades utilizando o método de Hakki-Coleman.

Um analisador de rede interpreta os sinais detectados pela antena receptora, através de um *software*, e analisa o espectro característico da amostra para determinação da permissividade dielétrica (ϵ), a tangente de perda dielétrica ($tg\delta$) e o fator de qualidade do material ($Q = 1/tg\delta$). Tal configuração permite a propagação de ondas de vários modos como transversais elétricas (TE), transversais magnéticas (TM), ou eletromagnéticas transversais híbridas (HEM).

Antonio Jefferson Manguieira Sales, Mairton Cavalcante Romeu, Antonio Sérgio Bezerra Sombra. Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, E-mail: jeffsales.brasil@gmail.com

Ronaldo Cristino Mariano, Bruno Sousa Araújo, Departamento de Física, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, E-mail: ronaldoifce@gmail.com

As medidas realizadas na faixa de microondas para caracterização dielétrica das amostras, foram obtidas com o auxílio de um analisador de rede HP8716ET da *Hewlett-Packard (HP)*, munido de dois cabos coaxiais conectados aos respectivos “*probes*” de transmissão e recepção, juntamente com um sistema Hakki-Coleman, modelo “300C Courtney Ressonator” da Damaskos, Inc. A faixa de frequência do analisador vai de 50 MHz a 13,5 GHz. Os valores de constante dielétrica (ϵ), da tangente de perda dielétrica ($tg\delta$) e do fator de qualidade (*Q*) foram obtidos da frequência de ressonância do modo TE_{011} , para cada amostra em temperatura ambiente, utilizando-se o *Software Courtney* da Damaskos, Inc. O modo TE_{011} foi usado por ser o mais utilizado na literatura e por sua fácil identificação.

A largura de banda (*BW*) da DRA foi relacionada com o fator de qualidade *Q* através da equação:

$$BW = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{s-1}{\sqrt{sQ}} \quad (7)$$

em que Δf é a variação da frequência em -10 dB e *s* é o *VSWR* “Voltage Standing Wave Ratio” desejado na entrada do DRA.

A frequência de ressonância do ressoador na antena ($f_r = f_0$) é o valor de frequência em que a perda de retorno foi mínima. Os valores de perda de retorno indicam a razão do quanto de energia fornecida para o ressoador é devolvida ao analisador de rede. Valores de perda de retorno próximos de 0 (zero) dB indicam que toda energia é devolvida à fonte [9].

III. RESULTADOS

A. Difração de Raio-X

O pó foi preparado e calcinado com o intuito de obtermos a fase α -BNO (estrutura cristalina ortorrômbica), indicada na literatura como sendo a fase do BNO que pode ser produzida em baixas temperaturas, ou seja, temperaturas abaixo de 1000 °C.

O difratograma do pó moído e calcinado a 850 °C por 3 h, obtido pela difração de raio-X, foi comparado com o difratograma padrão (ICSD) e é apresentado na Figura 3.

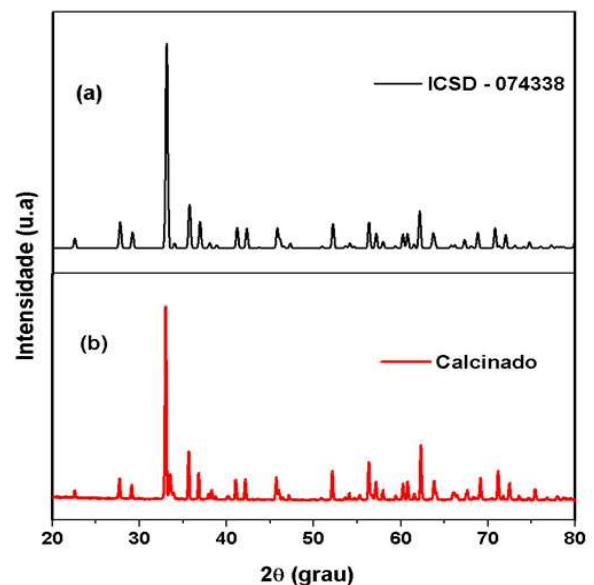


Figura 3 – (a) Difratograma padrão e (b) do pó calcinado.

A natureza dos padrões de difração mostrou a presença da fase α -BNO desejada e a identificação da maioria dos picos de difração foram realizadas e encontrou-se em concordância com a estrutura cristalina ortorrômbica reportada.

Pelo refinamento Rietveld foi possível fazer a análise quantitativa de fase α -BiNbO₄ presente no pó calcinado, além de obtermos os parâmetros de rede que são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Dados do refinamento Rietveld para a amostra BNO padrão obtido a partir da difração de raios-X.

Parâmetros Estruturais					
a	5.6797	b	11.7090	c	4.9857
α	90	β	90	γ	90
Densid. (g/cm ³)	6.861	Massa (%)	98.81	Molar (%)	99.12
R-P (%)	15.56	R-WP (%)	20.02	R-Esperado (%)	10.77
S	1.85	DW	0.35	Grupo Espacial	P N N A (52)

O difratograma observado (obs), calculado (calc) e a diferença (obs-calc) é mostrado na Fig. 4, respectivamente para o refinamento Rietveld do BNO puro, este é mais um indicador da eficiência do refinamento.

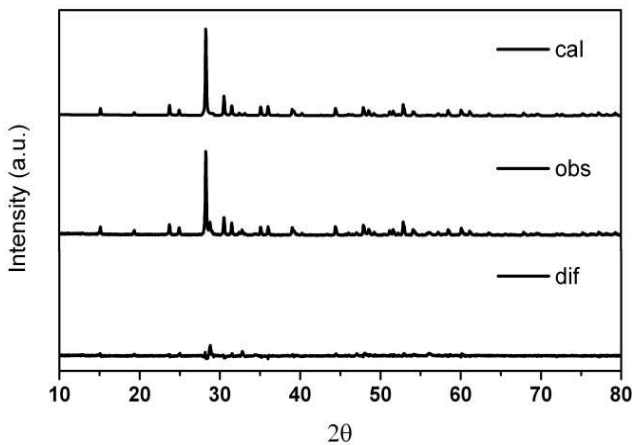


Figura 4 – Padrões de Difração do refinamento de Rietveld para BiNbO₄ calculado, observado e a diferença.

Para as amostras prontas (prensadas e sinterizadas a 1025°C por 3h), os padrões de difração de Raios-X foram obtidos e comparados com os padrões de referência ICSD com o auxílio do programa X'Pert HighScore Plus.

Na Figura 5, são apresentados os padrões de difração para as amostras: (a) ICSD - 010247; (b) BNO1025; (c) BNO3Zn; (d) BNO5Zn; (e) BNO10Zn. Em (a), o padrão de referência apresentado para comparação com as demais amostras, foi de uma estrutura β -BNO (fase triclinica), já que a temperatura de sinterização para as amostras desta figura foi de 1025 °C, temperatura esta que supera a temperatura de transição de fase α -BNO (Ortorrômbica) para β -BNO (Triclinica) segundo a literatura.

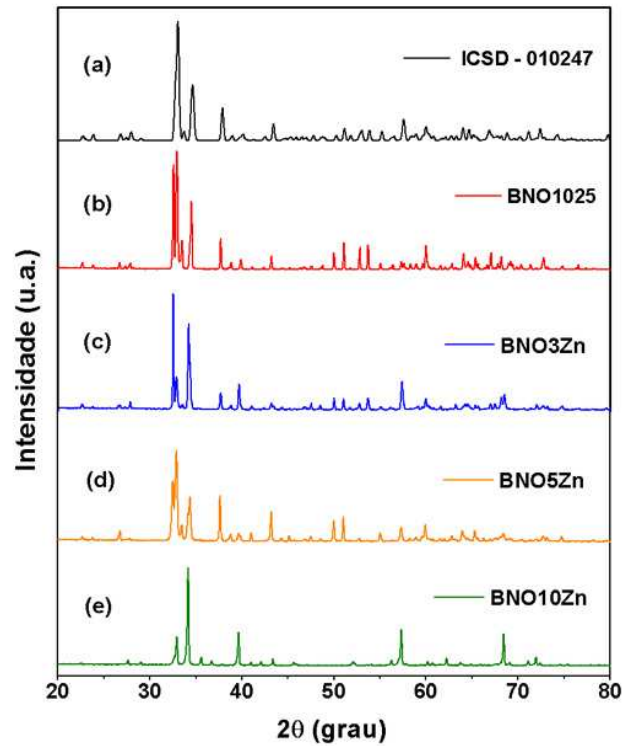


Figura 5 – Difratogramas das amostras de BNO sinterizadas a 1025 °C e adicionadas com ZnO: (a) Padrão de referência; (b) BNO1025; (c) BNO3Zn; (d) BNO5Zn; (e) BNO10Zn.

A comparação das amostras (b), (c), (d) e (e) com a amostra padrão (a), revela que com o incremento das adições de ZnO, as amostras não sofreram uma transição de fase, como esperado. Percebe-se que, com a maior adição em (e), não houve praticamente transição, não havendo coincidências com a maior parte dos picos mais intensos da amostra padrão. Com as amostras de menores adições (c e d), houve uma notória transição, com semelhanças de grande parte dos picos da amostra padrão. A amostra (b), sem adição, mostrou concordância com a literatura, tendo uma maior quantidade de picos semelhantes a da amostra padrão triclinica. Portanto, o ZnO influenciou no fato da não ocorrência, parcial ou total, de transição do BNO ortorrômbico para triclinico, havendo a necessidade de um estudo estrutural mais aprofundado para o discernimento das fases, assim como suas quantificações.

B. Análise Dielétrica em Microondas

As amostras utilizadas para a análise dielétrica em frequências de microondas, sob a técnica de Hakki e Coleman, tiveram que obedecer na suas fabricações, a proporção 2:1 em suas dimensões, ou seja, o diâmetro corresponde ao dobro da altura. Desta forma, foi possível a identificação do modo TE₀₁₁ para caracterização dielétrica das amostras cerâmicas da série do BNO sinterizadas 1025 °C. A Figura 6, apresenta o gráfico da variação da constante dielétrica (ϵ_r) em função da concentração de ZnO.

Antonio Jefferson Mangueira Sales, Mairton Cavalcante Romeu, Antonio Sérgio Bezerra Sombra. Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, E-mail: jeffsales.brasil@gmail.com

Ronaldo Cristino Mariano, Bruno Sousa Araújo, Departamento de Física, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, E-mail: ronaldoifce@gmail.com

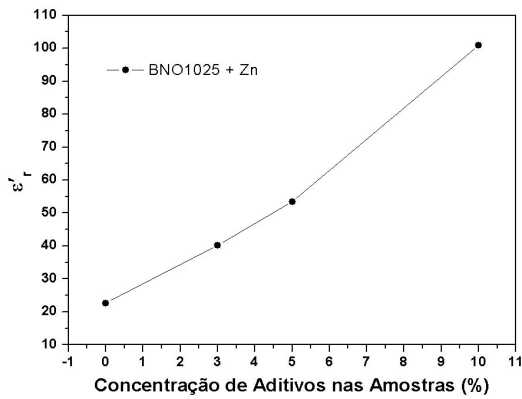


Figura 6 - Variação da constante dielétrica (ϵ') em função da concentração de ZnO.

É notória a ocorrência de aumento da constante dielétrica com o incremento da adição.

A Figura 7, apresenta o gráfico da variação da tangente de perdas dielétricas ($tg\delta$) em função da concentração de ZnO.

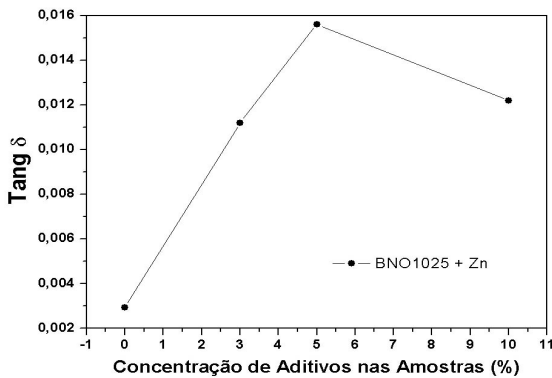


Figura 7 - Variação da tangente de perdas dielétricas ($tg\delta$) em função da concentração de ZnO.

Este gráfico mostra que apesar de haver um aumento na tang das perdas dielétricas, elas se matem na ordem de 10^{-2} quando adicionadas de ZnO. Há um indicativo de que com o aumento de 10% de Zn, o BNO tenha reduzido a perda por não formar fase triclínica e manter a fase inicial ortorrômbica.

A Figura 8, apresenta o gráfico da variação do fator de qualidade (Q_u) em função da concentração de ZnO. A adição de ZnO promoveu uma queda significativa em relação a amostra pura BNO1025.

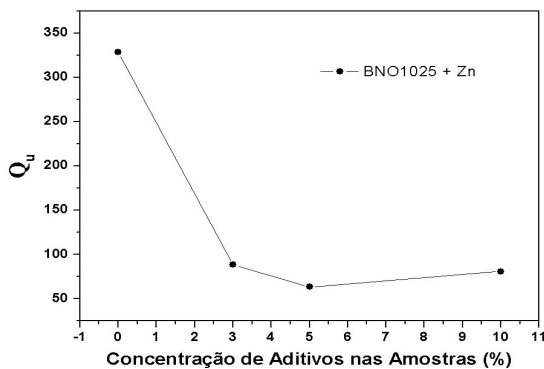


Figura 8 - Variação do fator de qualidade (Q_u) em função da concentração de ZnO.

Antonio Jefferson Manguiera Sales, Mairton Cavalcante Romeu, Antonio Sérgio Bezerra Sombra. Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, E-mail: jeffsales.brasil@gmail.com

Ronaldo Cristino Mariano, Bruno Sousa Araújo, Departamento de Física, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, E-mail: ronaldoifce@gmail.com

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos através da técnica de Hakki e Coleman em frequências de microondas para todas as amostras. É apresentado a frequência de ressonância (f_r) de cada amostra, a permissividade (ϵ') a tangente de perda ($Tan\delta$) e largura de banda (BW3db).

Tabela 1 – Dados do refinamento Rietveld para a amostra BNO padrão obtido a partir da difração de raios-X.

Amostras	f_r (GHz)	ϵ'	Tan δ	BW3db (GHz)
BNO1025	5,278	22,651	2,94E-03	0,017
BNO3Zn	4,179	40,195	1,12E-02	0,048
BNO5Zn	3,653	53,464	1,56E-02	0,058
BNO10Zn	2,677	100,908	1,22E-02	0,033

IV. CONCLUSÕES

A caracterização estrutural analisada por Difração de Raios-X (DRX) e com identificação e refinamento de Rietveld do padrão difratométrico para o pó (sem adição de ZnO), confirmou a obtenção da fase α -BiNbO₄ com estrutura cristalina ortorrômbica e parâmetros de rede ($a = 5,6792\text{Å}$; $b = 11,7081\text{Å}$ e $c = 4,9823\text{Å}$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) através da síntese de estado sólido com moagem mecânica de alta energia. Para os padrões da série sinterizada com adição de ZnO a 1025 °C, houve modificações visíveis nos difratogramas quando comparados com os padrões da amostra de BNO puro, que apresentou difratograma característico de estrutura triclínica. Na faixa de microondas estudado, as adições indicaram que com o incremento da porcentagem da adição do ZnO, houve um aumento nos valores da permissividade dielétrica e suas tangentes de perda se conservaram na ordem de 10^{-2} . A frequência de ressonância varia de 2,677 a 5,278 GHz, para todas as amostras.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e a U.S. Air Force Office of Scientific Research (AFOSR) (FA9550-06-1-0543 and FA9550-08-1-0210). LOCEM-UFC, pelas medidas de MW e ao Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da UFC.

REFERÊNCIAS

- [1] M. T. Sebastian (Eds.). Dielectric Materials for Wireless Communications. 1st. Edition. Elsevier Ltd. (2008).
- [2] D. Zhou, H. Wang, X. Yao, X. Wei, F. Xiang, L. Pang Applied Physics Letters, **90**, (2007) 172910.
- [3] D. Zhou, H. Wang, X. Yao, *Materials Chemistry and Physics*, **104** (2007) 397–402.
- [4] Y. C. Liou, W. C. Tsai, H. M. Chen, *Ceramics International*, **35** (2009) 2119–2122.
- [5] H.M. Rietveld, *Acta Crystallogr.* **22** (1967) 151.
- [6] H. M. Rietveld, *J. Appl. Cryst.* **2** (1969) 65-67.
- [7] POZAR, D. M. Microwave Engineering. 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc. New York, 1998.
- [8] PETOSA, A. Dielectric Resonator Antenna Handbook. Norwood: Artech House, 2007.
- [9] Luck, K. M.; Leung, K. W. Dielectric Resonator Antennas, Research Studies Press LTD, England, 2003.
- [10] Long, S. A.; McAllister, M. W.; Shen, L. C. The resonant cylindrical dielectric cavity antenna, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 31, pp.406-412, 1983.
- [11] HAKKI, B. W., COLEMAN, P. D. IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-8, 1960,