

Síntese e Caracterização do BaTiO₃ pelo Método da Coprecipitação e Aplicação em Antenas *Patch* de Microfita

Synthesis and Characterization of BaTiO₃ by Coprecipitation Method and Antenna Application Microfite *Patch*

Gabriel Sá de Sena¹, Roberto Viana de Sales¹, Eduardo da Silva Gomes¹
Filipe Amaral², Fernando Mendes^{3,4,5}, Ana Angélica Mathias Macêdo¹

¹Laboratório de Pesquisa – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus Imperatriz, Av. Newton Belo, S/N, Vila Maria, CEP: 65906-335, Imperatriz, MA, Brasil.

²Politécnico de Coimbra, ESTeSC, DCC, Rua 5 de Outubro - SM Bispo, Apartado 7006, CEP: 3046-854 Coimbra, Coimbra, Portugal

³Politécnico de Coimbra, ESTeSC, DCBL, Rua 5 de Outubro - SM Bispo, Apartado 7006, CEP: 3046-854 Coimbra, Coimbra, Portugal.

⁴CNC.IBILI Consortium/ Center for Innovative Biomedicine and Biotechnology (CIBB), University of Coimbra, Azinhaga de Santa Comba, Celas, CEP: 3000-548 Coimbra, Portugal.

⁵Biophysics Institute, Coimbra Institute for Clinical and Biomedical Research (iCBR) area of Environment Genetics and Oncobiology (CIMAGO), Faculty of Medicine, University of Coimbra, Azinhaga de Santa Comba, Celas, CEP: 3000-548 Coimbra, Portugal.

e-mail: gabrielsena.eng@gmail.com, roberto.viana782@gmail.com, eduardo.anm2@gmail.com, anaangellica@yahoo.com.br, filipe.amaral79@hotmail.com, fjmenes@estescoimbra.pt

RESUMO

O nosso objetivo foi sintetizar e caracterizar o Titanato de Bário (BaTiO₃) para aplicação em substrato dielétrico em antenas *patch* de microfita. O surgimento de novas tecnologias sem fio resulta em demandas crescentes por antenas de baixo custo que permitam a união de diferentes tecnologias em um único dispositivo portátil. BaTiO₃, composto cerâmico com estrutura cristalina do tipo *perovskita* (ABO₃), encaixa-se na classe de cerâmicas eletrônicas e pode ser utilizado na forma de filme fino, para composição de componentes de memória RAM de computadores, devido a polarização espontânea reversível. As antenas de microfita constituí-se de um substrato dielétrico onde uma das faces é impresso um condutor radiante ou *patch* e na outra face, um plano terra. Há vários métodos para sintetizar o BaTiO₃, todavia nesta pesquisa foi sintetizado por coprecipitação, a partir do Acetato de Bário (BaC₄H₆O₄), Dióxido de Titânio (TiO₂) e Ácido Nítrico (HNO₃). Após síntese, foi caracterizado por Difração de Raios X com refinamento pelo método de *Rietveld*, onde obteve-se a fase tetragonal, na qual o BaTiO₃ possui ferroeletricidade, além de medidas de Densidade (5,698 g/cm³), Porosidade (5,31 %) e Microscopia Eletrônica de varredura, cujo constatou uma distribuição granular homogênea com tamanho médio do cristalito de 500 nm. Além disso, simulou-se uma antena no Ansoft HFSS® para aplicação na faixa de 6.5 GHz, obtendo-se uma largura de banda de 240 MHz. O método de síntese por coprecipitação se mostrou eficiente e a antena promissora para aplicações em sistemas *wireless*.

Palavras-chave: BaTiO₃. Antenas. Coprecipitação. HFSS.

ABSTRACT

Our aim was to synthesize and characterize barium titanate (BaTiO₃) for application in dielectric substrate in microtape patch antennas. The emergence of new wireless technologies results in increasing demands for

low-cost antennas that allow the union of different technologies into a single portable device. BaTiO₃ is a ceramic compound with crystalline perovskite structure (ABO₃), which fits the class of electronic ceramics and can be used, in the form of thin film, for the composition of computer RAM components due to reversible spontaneous polarization. The microtape antennas consist of a dielectric substrate where one side is printed a radiant conductor or patch and on the other side, a flat earth. There are several methods to synthesize BaTiO₃, however in this research it was synthesized by coprecipitation, from barium acetate (BaC₄H₆O₄), Titanium Dioxide (TiO₂) and Nitric Acid (HNO₃). After synthesis, it was characterized by X-ray diffraction with refinement by the Rietveld method, where the tetragonal phase was obtained, in which BaTiO₃ has ferroelectricity, in addition to density measurements (5,698 g/cm³), porosity (5.31 %) and Scanning Electron Microscopy, which found a homogeneous granular distribution with an average crystallite size of 500 nm. In addition, an antenna was simulated in the Ansoft HFSS® for application in the range of 6.5 GHz, and a bandwidth of 240 MHz was obtained. Based on the results, the synthesis method proved to be quite efficient and a favorable antenna for applications in wireless network systems.

Keywords: BaTiO₃. Antennas. Coprecipitation. HFSS

1. INTRODUÇÃO

A partir de 1960, as tecnologias envolvidas em sistemas de comunicação cresceram exponencialmente e consequentemente aumentaram às exigências do mercado para que os produtos desenvolvidos se adequem em frequências definidas [1] para aplicação em tecnologia da informação e comunicação, tais como: capacitores, condutores, memórias dentre outros. Porém, há dificuldade em encontrá-los para suprir as carências das indústrias de telecomunicações [2].

A demanda do mercado destaca-se em estímulo à descoberta e identificação de materiais cerâmicos com baixo ponto de fusão e baixa temperatura de sinterização para serem utilizados na produção de circuitos integrados (CI), encapsulados em cerâmica, onde resistores, capacitores e indutores são construídos e integrados a outros componentes de microeletrônica [3]. Para estas e outras aplicações, materiais cerâmicos dielétricos são utilizados e estudados devido suas propriedades dielétricas como: constante dielétrica e perdas dielétricas [4].

O BaTiO₃ é um composto cerâmico com estrutura cristalina do tipo perovskita simples (ABO₃). Os íons de Ba²⁺ estão localizados nos oito vértices do cubo. O íon Ti⁴⁺ localiza-se no centro e cada íon de O²⁻ encontra-se em cada uma das seis faces, como ilustra a Figura 1 [5]. O que difere a fase tetragonal da cúbica é a distância entre as posições de simetria que diferem uma fase da outra. [2].

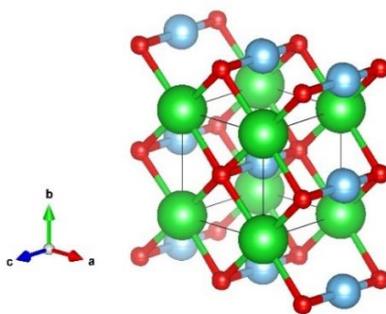


Figura 1: Célula Unitária do BaTiO₃ para T > 120°C.

Na fase tetragonal, os íons de Ti⁴⁺ e Ba²⁺ se deslocam em relação ao O²⁻ formando uma estrutura com um eixo em torno de 1% mais longo que os outros dois. Nesta fase, o BaTiO₃ apresenta o comportamento ferroelétrico e piezoelétrico. Este foi o primeiro material ferroelétrico descoberto em meados da década de 60 e tem várias pesquisas na busca de aplicações em componentes eletrônicos [1]. Materiais ferroelétricos exibem polarização eletrônica espontânea em determinadas faixas de temperaturas, ou seja, não necessitam de um campo elétrico para criar dipolos, porém esta polarização pode ser revertida na aplicação de um campo elétrico externo. Para o BaTiO₃ este fenômeno ocorre devido às posições assimétricas dos íons em sua organização tetragonal [6]. Esta fase ferroelétrica é a consequência do posicionamento dos íons Ba²⁺, Ti⁴⁺ e O²⁻ na célula unitária para temperaturas entre -90°C e 120°C, todavia a fase tetragonal passando para cúbica (120°C < T < 1460°C) e hexagonal (T > 1460°C), o BaTiO₃ deixa de apresentar a ferroeletricidade [7]. A Figura 2 apresenta momento dipolar que resulta dos deslocamentos relativos dos íons Ti⁴⁺ e O²⁻ nas posições simétricas. [2].

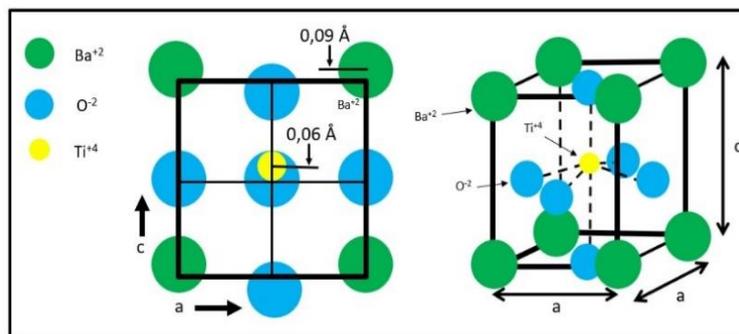


Figura 2: Estrutura Polarizável do BaTiO₃.

O comportamento paraelétrico acontece devido à temperatura de transição de fase, conhecida como Temperatura Curie (T_C), para temperaturas acima da T_C , os materiais ferroelétricos deixam de exibir a polarização espontânea passando a ser chamado de material paraelétrico [8]. Uma das aplicações de materiais ferroelétricos são em antenas, que são dispositivos de transição entre a propagação de ondas eletromagnéticas guiadas em linhas de transmissão. O estudo das antenas em telecomunicações reside no fato de serem fundamentais para transmissão e recepção de sinais [9].

As antenas de microfita têm como configuração básica o substrato dielétrico onde uma das faces é impresso um condutor radiante ou *patch*, termo que pode ser entendido como placa pequena, e na outra face é impresso um plano terra [10]. O patch e o plano de terra podem apresentar diversas geometrias, dependendo da aplicação [11]. Antenas *patch* de microfitas possuem vantagens, tais como: baixo perfil, peso reduzido, facilidade de fabricação e baixo custo e por desvantagem possui largura de banda estreita, determinada pelas dimensões do *patch* metálico e altura do substrato [12].

O *High Frequency Structure Simulator* (HFSS) é um software que simula o funcionamento de antenas por meio do Método dos Elementos Finitos (FEM) e determina os parâmetros de espalhamento de estruturas passivas e a distribuição tridimensional de campos eletromagnéticos no interior de uma estrutura [13]. O FEM consiste em dividir o objeto a ser analisado em pequenas regiões, denominada de elementos finitos, que possui geometria tetraédrica. O conjunto de tetraedros é chamado malha (*mesh*) do elemento finito.

Os valores de campos elétricos e magnéticos são calculados no interior de cada tetraedro por meio da interpolação a partir dos valores destes campos nas arestas do tetraedro [11]. O objetivo do FEM em eletromagnetismo é encontrar soluções aproximada para as Equações de Maxwell que satisfaçam as condições iniciais e de fronteira ou de contorno. Esta modelagem eletromagnética, baseia-se no processo da interação dos campos eletromagnéticos entre objetos físicos e o meio em que se encontram. Com o HFSS, pode-se obter parâmetros tais como a frequência de ressonância e os campos eletromagnéticos. A visualização 3D dos campos eletromagnéticos possibilita a geração de modelos para avaliar de forma eficiente a qualidade do sinal, incluindo as perdas do meio de transmissão [14].

2. MATERIAS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para síntese do BaTiO₃ por Coprecipitação foram utilizados os reagentes listados na Tabela 1.

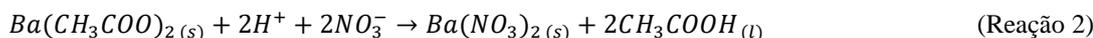
Tabela 1: Reagente, Fórmula molecular, Pureza e Massa Molar empregados para sintetizar o BaTiO₃.

Reagente	Fórmula Molecular	Pureza (%)	Massa Molecular (g/mol)
Acetado de Bário	C ₄ H ₆ BaO ₄	99,00	197,35
Dióxido de Titânio	TiO ₂	98,00	79,86
Ácido Nítrico	HNO ₃	52,00	63,01
Hidróxido de Amônio	NH ₄ OH	32,00	35,04

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação da Solução de Nitrato de Bário (7,66%).

Preparou-se uma solução homogeneizando 2,5 mL de ácido nítrico em 200 mL de água destilada (Reação 1); em seguida adicionou-se 15,32 g de acetato de bário (Reação 2) na proporção de 1:1 de acetato de bário com ácido nítrico.



2.2.2 Preparação da Solução de Dióxido de Titânio (3,40%)

Preparou-se uma solução com 4,79 g de Dióxido de Titânio em 200 mL em água gaseificada com CO₂ vendida comercialmente.

2.2.3 Síntese do Titanato de Bário (BaTiO₃)

Para síntese do BaTiO₃ foi utilizado o método da coprecipitação. Homogeneizou-se as duas soluções descritas acima [15]. Logo após, adicionou-se lentamente hidróxido de amônio (7 mL) até o sistema atingir o pH 9. Em seguida, o material foi aquecido a 120°C sob agitação por 3 horas, depois disso o material ainda hidratado foi pulverizado e calcinado a 1100 °C por 8 horas (Tabela 2). A Reação (3) apresenta a síntese do BaTiO₃.

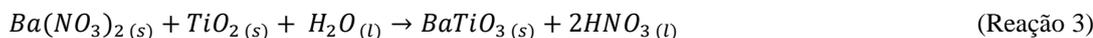


Tabela 2: Temperatura, Taxa de aquecimento e tempo de sinterização para tratamento térmico do BaTiO₃.

Etapa	Temperatura		Taxa de Aquecimento (°C/min)	Tempo de Sinterização (h)
	Inicial (°C)	Final (°C)		
1	20	800	05	-
2	800	1000	10	-
3	1000	1100	01	08
4	1100	20	-10	-

2.3 Técnicas de Caracterização

As medidas de difração de Raios X (DRX) foram realizadas pelo método do pó, depositando-se o material em porta amostra de vidro. Utilizou-se um equipamento DRX Rigaku – modelo Miniflex II, com tensão de 30 kV, corrente de 15 mA, com radiação CuK α ($\lambda=1,54 \text{ \AA}$), passo de 0,02 por segundo no intervalo de 15° à 80°(2 θ) de forma contínua.

As medidas de Densidade e Porosidade foram feitas a partir do método de Arquimedes, fazendo uso do picnômetro. A equação que rege a medida de densidade é dada pela Equação (1), onde pesa-se a amostra em ar e imerge em água destilada, que possui densidade conhecida, ocorrendo variação na densidade conforme a temperatura utilizada.

$$\rho_A = \frac{m_s}{(m_L - m'_L)} \cdot \rho_L \quad (1)$$

As micrografias da microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram obtidas utilizando microscópio com emissão de campo térmico, da marca JEOL, modelo JSM-7100F, com magnificação de 5000x, operando em aceleração de voltagem de 15kV com filamento de tungstênio em uma câmara a vácuo. O pó dos materiais foi adicionado em *stubs* de alumínio e analisado. As análises de Espectroscopia Dispersiva em Energia (EDS) foram coletadas por meio de um detector de quantificação elementar pertinente ao MEV.

Para melhor compreensão das etapas para a síntese e as técnicas de caracterização utilizadas para o BaTiO₃, a Figura 3 apresenta o fluxograma.

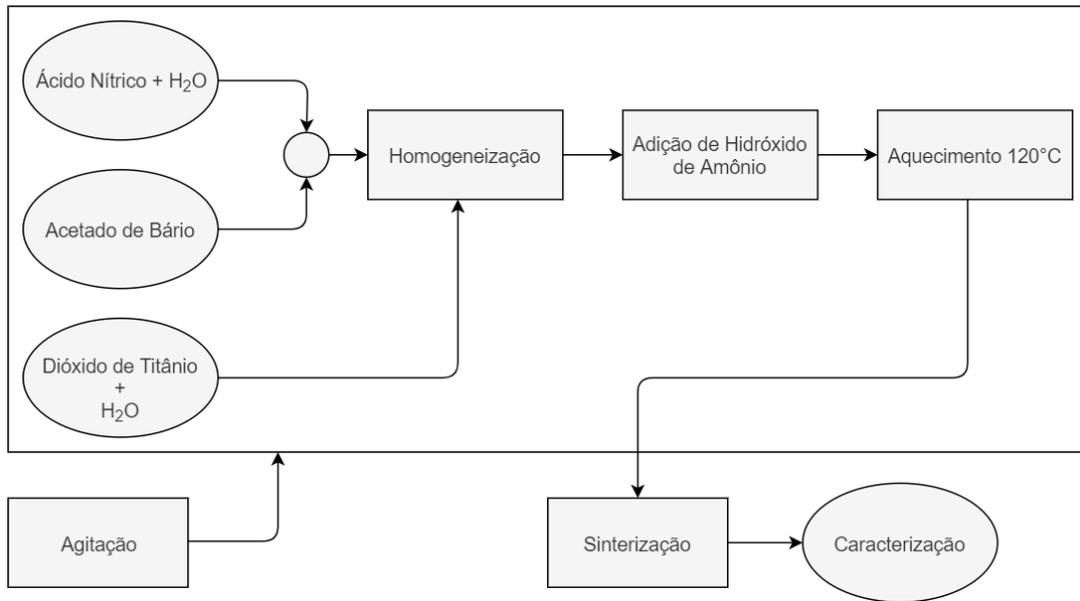


Figura 3: Fluxograma com as operações unitárias para síntese do BaTiO₃.

2.4 Simulação High Frequency Structure Simulator

A Antena Patch de Microfita foi simulada com auxílio do *High Frequency Structure Simulator* (HFSS), *software* que por meio do Método dos Elementos Finitos (FEM), determina os parâmetros lineares de estruturas passivas e a distribuição tridimensional de campos eletromagnéticos no interior de uma estrutura. Os parâmetros lineares são divididos em dois grupos, são eles: parâmetros de espalhamento e de impedância. O parâmetro de espalhamento, S_{NN} , representa as relações de dispersão, distorção e reflexão entre os sinais de entrada e saída de uma antena. O parâmetro de impedância, Z_{NN} , relaciona a alimentação e o seu efeito na estrutura, sendo obtido a partir da matriz de espalhamento.

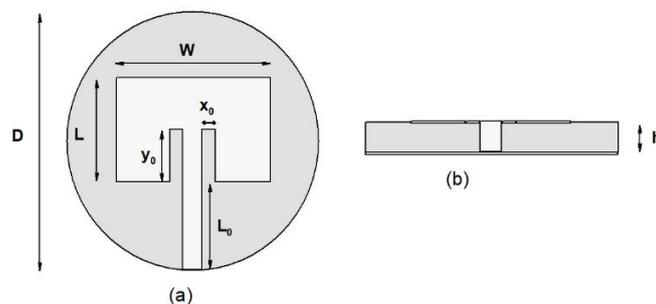


Figura 4: (a) Vista Superior e (b) Vista Frontal da Antena Patch.

Tabela 3: Dimensões da Antena Patch proposta.

Parâmetro	Valor (mm)
L	9,8
W	14,4
L ₀	6,8
x ₀	1,0
y ₀	5,0
H	2,25
D	26,28

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Difração de Raios X

O padrão de DRX registrado à temperatura ambiente do BaTiO₃ sintetizado pelo método da coprecipitação é apresentado na Figura 5. A amostra apresenta todos os picos característicos da fase tetragonal do BaTiO₃ conforme o padrão teórico ICSD-29146, no entanto percebe-se a presença de subfases derivadas dos materiais de partida que não reagiram e nem foram eliminados durante o tratamento térmico realizado [16]. Esses picos localizados em 25°(2θ), 28°(2θ) e 29° (2θ) pertencem a BaTi₂O₅ (ICSD-16634), verificando que as subfases não interferiram na obtenção da fase desejada. A presença das fases secundárias é resultado do tempo em que amostra foi sintetizada [6]. Utilizou-se temperatura de 1100°C durante 8h, porém não foi suficiente para que a reação acontecesse por completo, fazendo com que surgissem tais fases. A Figura 5(b) apresenta o refinamento de *Rietveld* para o BaTiO₃. Utilizou-se o software GSAS (*General Structure Analysis System*) para refinamento, o padrão teórico ICSD-29146 da fase tetragonal do BaTiO₃ e o ICSD-16634 da subfase.

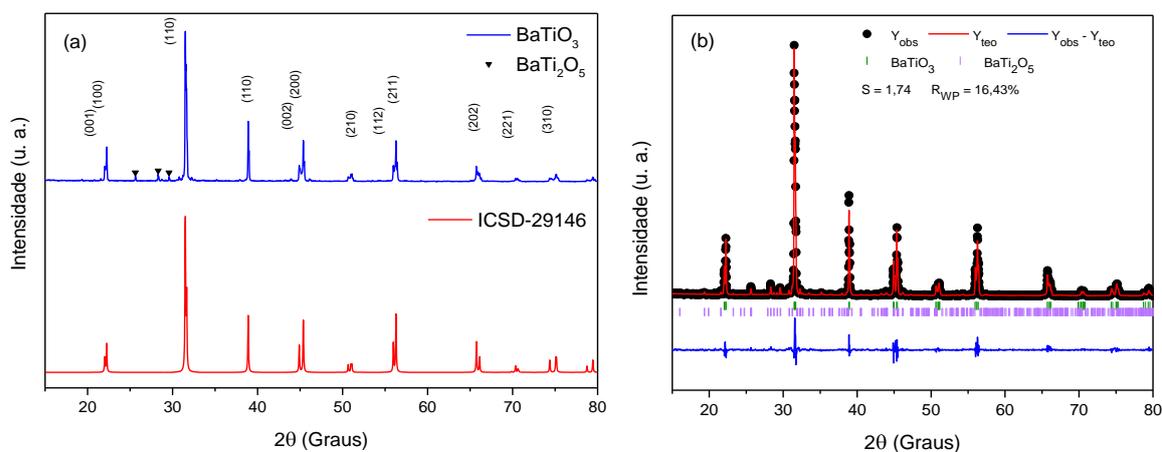


Figura 5: (a) Difratoograma na fase tetragonal apresentando subfases e (b) Refinamento de *Rietveld* do BaTiO₃.

Com análise quantitativa dos parâmetros do refinamento constatou-se a formação de 89,7% da fase principal e 10,3% da subfase. Verificou-se que o BaTiO₃ sintetizado, cristalizou-se em uma estrutura tetragonal com grupo espacial P4/mmm (#123) com diferença menor que 1% do padrão teórico.

O parâmetro *S* ou *goodness of fit* (GOF), segundo Stanhaus [17] deve estar próximo a 1,0, significando melhor qualidade do refinamento, pois o *R_{WP}* já atingiu o limite. Com o refinamento de *Rietveld* obteve-se *S* = 1,74 o que demonstra a qualidade refinamento. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de rede e os dados do perfil de qualidade do refinamento obtidos. Soares [18] afirma que parâmetro de *R_{WP}* verifica a convergência do refinamento, se estiver decaindo, então o refinamento está com boa qualidade. Obteve-se este parâmetro no valor de 16,43% dentro do padrão aceitável.

Tabela 4: Dados do Refinamento de *Rietveld* do BaTiO₃.

PARÂMETRO	ICSD-29146	BaTiO ₃
Sistema Cristalino	Tetragonal	Tetragonal
Grupo Espacial	P4/mmm (#123)	P4/mmm (#123)
Parâmetros de Rede (Å)	a = 3,9939(5)	a = 3,9981(4)
	b = 3,9939(5)	b = 3,9981(4)
	c = 4,0343(5)	c = 4,0353(4)
Ângulo	(α = β = γ = 90°)	(α = β = γ = 90°)
Volume (Å ³)	64,3521	64,507(2)
S (GOF)		1,74
R _{WP} (%)		16,43

3.2 Densidade e Porosidade

A Tabela 5 mostra os valores da densidade experimental, a densidade relativa e a porosidade do BaTiO₃. Os resultados foram obtidos utilizando a Equação (1). O valor da densidade teórica do BaTiO₃ é de 6,004 g/cm³

(ICSD-29146). A densidade experimental foi de $5,698 \text{ g/cm}^3$ e a relativa calculada foi de 94,68 %. De acordo com Silva e Silva [19], valores de densidade relativa obtidos próximos a 95% evidenciam o quanto eficiente é o método de síntese dos materiais em geral, já que a densidade relativa é uma razão entre a experimental e a teórica. A Tabela 5 também exhibe o valor da porosidade do BaTiO_3 , 5,31 %, de acordo com Tahir *et al.*, [20], há diminuição das propriedades mecânicas e elétricas dos materiais decorrente do alto valor de porosidade. Quanto menor o valor de porosidade, melhor serão os parâmetros mecânicos e elétricos. Parâmetros mecânicos como módulo de elasticidade, resistência à flexão, tenacidade à fratura e dureza; e elétricos como constante dielétrica e condução elétrica [21].

Tabela 5: Medidas de Densidade e Porosidade do BaTiO_3 .

Amostra	Densidade		Porosidade (%)
	Experimental (g/cm^3)	Relativa (%)	
BaTiO_3	5,698	94,68	5,31

3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia em Energia Dispersiva

Na Figura 6(a) e (b), observam-se na microscopia eletrônica de varredura (MEV) em duas regiões do BaTiO_3 com magnificação de x5000.

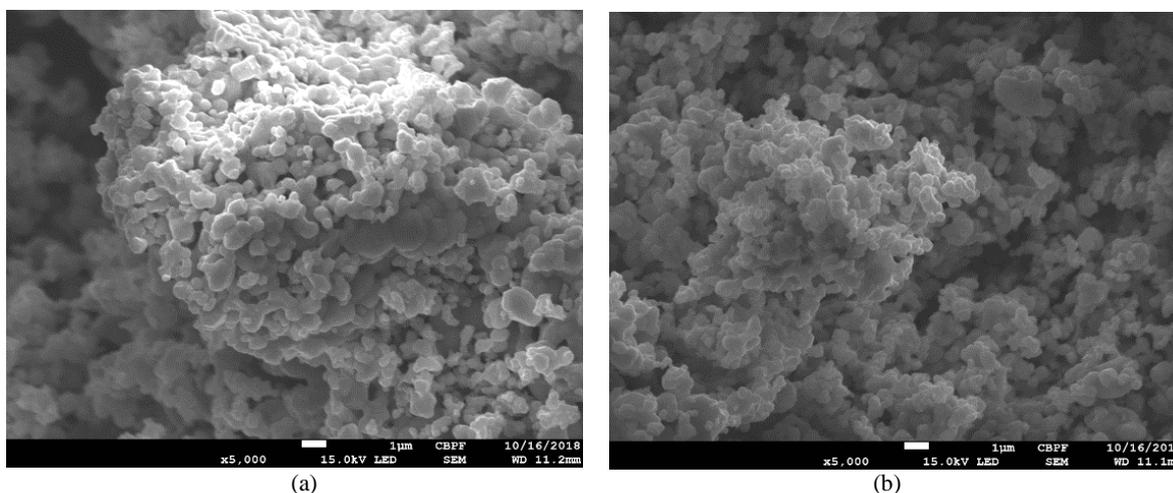


Figura 6: (a) e (b) Micrografias do BaTiO_3 aumentado x5000 em diferentes regiões.

Pode-se observar que não houve a presença de bastonetes, assim como no DRX, característicos do BaCO_3 que permanecem na matriz do BaTiO_3 em formação, se a temperatura de sinterização for baixa. Brito e Gouvêa [22], constataram que o BaTiO_3 sinterizado abaixo de 950°C , apresentam esses bastonetes. O material obtido neste trabalho foi sinterizado 1100°C , o que favoreceu a decomposição do BaCO_3 e formação da matriz tetragonal do BaTiO_3 . A análise realizada revelou que o pó sintetizado tem uma distribuição granular homogênea com tamanhos de grãos diferentes com tendência a formar aglomerados [23]. O tamanho médio do cristalito é de aproximadamente 500 nm.

Na Figura 7 observa-se o espectro de curva espectroscopia em energia dispersiva (EDS) do BaTiO_3 , identificando de modo semiquantitativo a razão estequiométrica dos elementos químicos durante a sinterização.

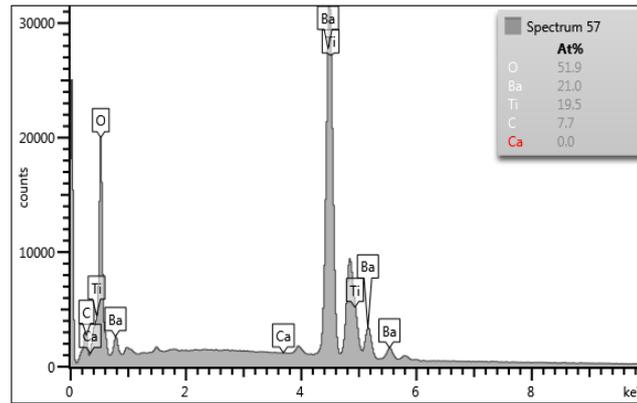


Figura 7: Curva EDS do BaTiO₃ sinterizado a 1100°C.

Nota-se que o Bário (Ba) e Titânio (Ti) apresentaram maior picos de energia, porém o Oxigênio (O) apresentou maior concentração, mas também foram detectados Carbono (C) e Cálcio (Ca) nas análises, todavia a presença do C pode ser explicada pela queima de percussores orgânicos durante a síntese do BaTiO₃ onde permaneceram resíduos; já para o Ca a energia detectada foi insignificante e pode estar associada a má interpretação do equipamento ou a presença como impureza em algum dos reagentes precursores.

3.4 Simulação da Antena Patch de Microfita

A antena foi simulada por meio do Ansoft HFSS®. Na Figura 8, nota-se a perspectiva da antena com todos os seus componentes, enquanto a Figura 9 representa a vista frontal da antena com destaque para porta de excitação *Lumped Port* com impedância de entrada de 50 Ω. Com a antena construída, o processo de simulação é iniciado.

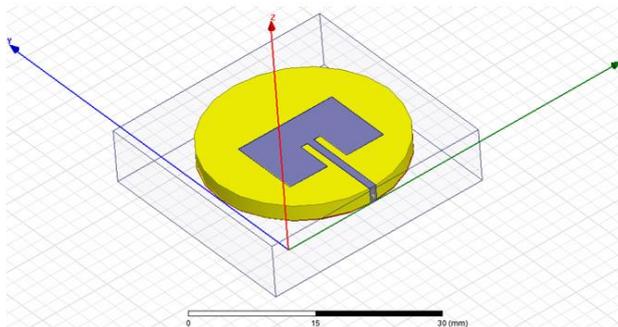


Figura 8: Perspectiva da antena *patch* simulada.

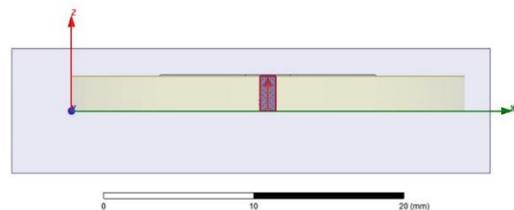


Figura 9: Porta de excitação da antena *patch* (*Lumped Port*).

3.4.1 Perda de Retorno

O primeiro parâmetro a ser analisado foi a perda de retorno (S_{11}) medido em decibéis (dB). A Figura 10 apresenta o valor simulado, o gráfico mostra um vale de no valor de -25,25 dB para frequência de 6,5 GHz que é chamada de frequência de ressonância devido a possuir a menor perda de retorno [24]. Este valor representa que ao incidir uma onda eletromagnética com frequência de 6,5 GHz, a antena retorna com uma perda de -25,25 dB e irradia o restante da potência. Para se obter uma antena de boa qualidade, BALANIS [9], define uma boa perda de retorno valores menores que -10 dB.

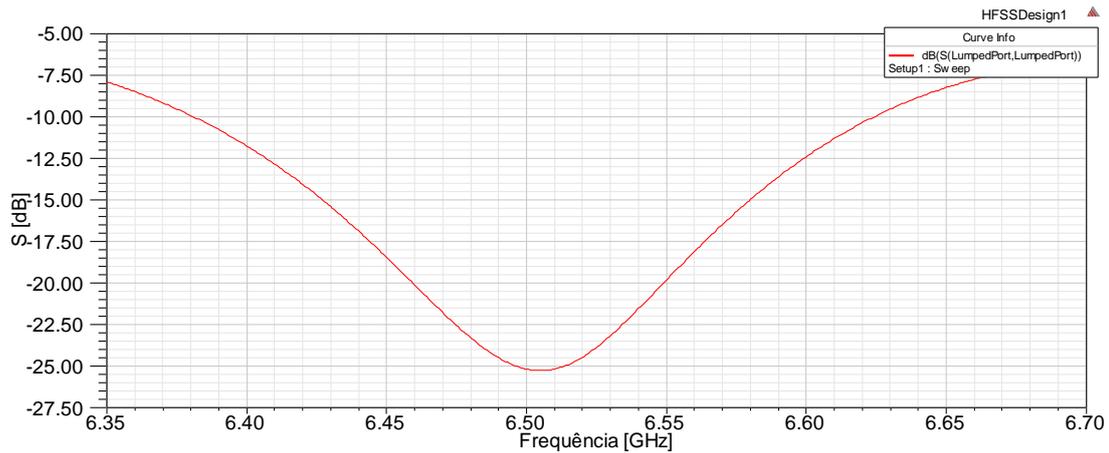


Figura 10: Parâmetro S_{11} Perda de retorno da antena *patch*.

A partir da Figura 10, é possível obter a largura de banda da antena. Este parâmetro está associado ao intervalo de frequências a qual a antena opera de forma satisfatória, ou seja, é definido como intervalo de frequências em que o desempenho de uma antena, com relação a alguma característica, atende a um padrão específico BALANIS [9]. O valor absoluto é descrito como:

$$BW = f_2 - f_1 \quad (4)$$

Em termos percentuais,

$$BW = 100 \times \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (5)$$

Onde f_2 e f_1 são as frequências de máxima e mínima de operação, respectivamente, e f_0 é a frequência central de operação na faixa de -10 dB.

De acordo com a Figura 6, o valor de f_1 é 6,38 GHz, f_2 é de 6,62 GHz e f_0 corresponde a 6,5 GHz. A largura de banda (BW) calculada foi 240 MHz, isto é, 240 Mbits/s, que representa a quantidade de informações que pode ser transmitida, e o percentual (BW %) foi de 3,69%, no qual indica que a largura da banda é classificada como banda larga.

3.4.3 Voltage Stationary Wave Radio

A Figura 11 mostra o parâmetro de relação de onda estacionária de tensão (VSWR do inglês, *Voltage Stationary Wave Radio*) da linha de transmissão.

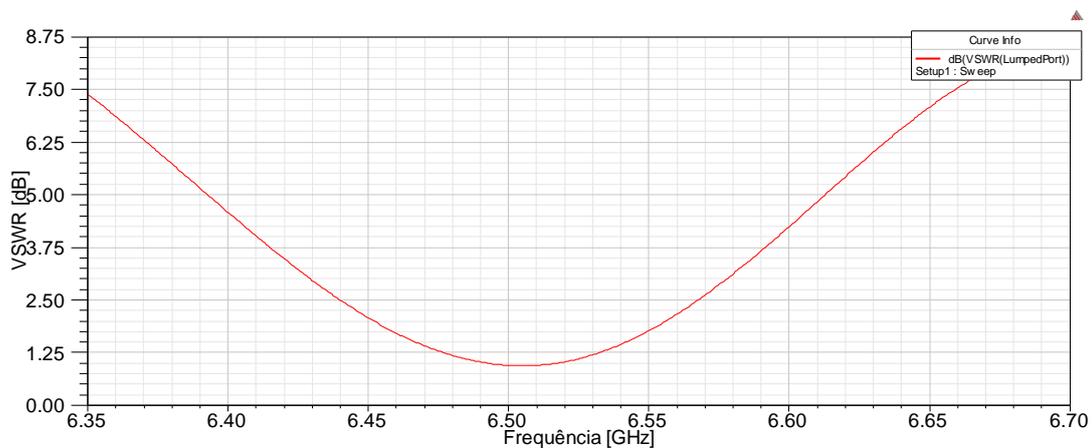


Figura 11: Coeficiente de onda estacionária.

O VSWR é definido como a razão entre os valores máximos e mínimos da amplitude de onda estacionária, ao longo do comprimento da linha de transmissão. É calculado medindo a tensão do sinal enviado e fazendo a comparação com a tensão do sinal refletido. Para esta simulação foi obtido um valor de

1,15 para frequência de 6,5 GHz. Segundo BALANIS [9], um valor aceitável é de $VSWR \leq 2$, pois a relação 2:1 significa que 88,9% da potência gerada é refletida e 11,1% são perdas. A potência refletida para a antena ficou acima de 95%, no qual mostra a eficiência energética na estrutura simulada. A perda de retorno e o coeficiente de onda estacionária de tensão são índices importantes para a determinação do desempenho das antenas FERNANDES [25].

3.4.4 Diretividade e Ganho

A Figura 12 apresenta o Ganho da antena, este parâmetro é definido como a razão entre a intensidade, em uma dada direção, e a intensidade de irradiação que se teria se a potência da antena fosse irradiada isotropicamente, ou seja, se em todas as direções tivessem a mesma intensidade de irradiação.

A antena simulada apresentou valor de ganho satisfatório, o ganho simulado foi de 3,85 dB. PAIVA *et al.*, [26] e DA SILVA *et al.*, [27], obtiveram valores abaixo, porém suas antenas apresentaram boa qualidade na transmissão de dados. Segundo SOFFIATTI [24], uma antena *patch* de microfita típica tem entre 3 dB e 6 dB de ganho.

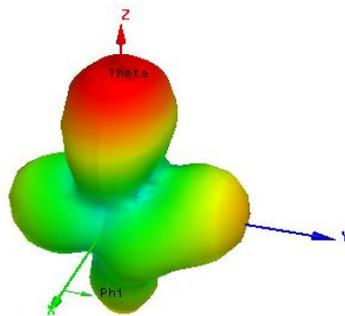
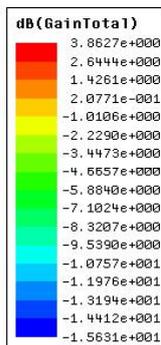


Figura 12: Ganho da antena *patch*.

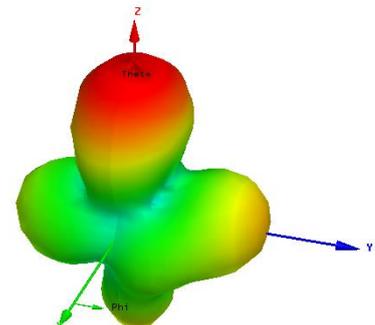
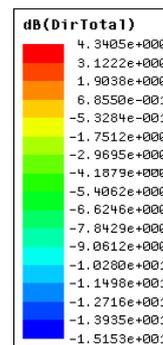


Figura 13: Diretividade da antena *patch*.

A diretividade de uma antena é definida como a razão entre a intensidade de irradiação na direção do máximo da antena e a intensidade de radiação da mesma antena [28]. Em outras palavras, este parâmetro indica em qual ponto a antena é capaz de concentrar a potência irradiada na direção de máxima irradiação. A Figura 13 apresenta o diagrama de radiação da diretividade. Uma antena apresenta um valor de diretividade ideal acima da 7 dB [29]. Nesta simulação, foi obtido um valor de diretividade máximo de 4,34 dB.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, o método por coprecipitação foi eficiente para síntese do substrato, que aplicado em antenas *patch* de microfita, poderá ser utilizado em aplicações que requeiram uma frequência de operação na faixa de 6.5 GHz. A antena simulada apresentou uma largura de banda (240 MHz) classificada como larga, sendo promissora para aplicação em sistemas de rede sem fio *wireless*.

5. AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem ao IFMA, ao CNPq, à FAPEMA pelo apoio financeiro e à UFMA e ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) pelo apoio nas medidas de Raio X e Microscopia Eletrônica de Varredura, respectivamente. Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), Portugal (Strategic Projects UID/NEU/04539/2013 e UID/NEU/04539/2019) e COMPETE-FEDER (POCI-01-0145-FEDER-007440) e fundos nacionais via FCT através de projeto UIDB/04539/2020 e UIDP/04539/2020 (CIBB).

6. BIBLIOGRAFIA

[1] NEIVA, L.S., CARTAXO, A.S., BONIFÁCIO, M.A.R., *et al.* Síntese de Materiais Cerâmicos com Estrutura Perovskita (BaTiO₃) e Análise das suas Características Estruturais e Constantes Dielétricas. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*. v.12, n. 2, pp. 96-104, 2017.

- [2] CALLISTER JR., W.D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 10 ed. Rio de Janeiro. LTC, 2020.
- [3] RIBEIRO, G.K. *Síntese e caracterização de materiais nanoestruturados luminescentes de composição CaTiO₃: Pr, La, Al*. Dissertação M.Sc. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019.
- [4] SILVA, M.C.O. *Propriedades estruturais e microestruturais de eletro-cerâmicas baseadas em BaTiO₃*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física de Materiais). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- [5] MITIC, V.V., BRANISLAV R., IVANA I., *et al.* “The 3D graph approach for breakdown voltage calculation in BaTiO₃ ceramics”. *International Journal of Modern Physics B*, v. 35, 2021.
- [6] MAGALHÃES, R.S., JUNIOR, W.D.M., SOUZA, A.E., *et al.* “Síntese De BaTiO₃ e SrTiO₃ Pelo Método Hidrotermal Assistido Por Micro-Ondas Utilizando Anatase Como Precursor De Titânio”. *Revista Química Nova*. v.10. n.2 p.166-170, 2016.
- [7] OLIVEIRA, M.A. *Investigação Das Propriedades Físicas Do Sistema Titanato De Bário Modificado Com Íons Doadores Nos Sítios A e/ou B*. Tese D.Sc. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017.
- [8] GAO, Z., YUYING W., ZHENG T., *et al.* “Ferroelectricity of trimethylammonium bromide below room temperature”. *Journal of Materials Chemistry C*. v. 8, n. 17, p. 5868-5872, 2020.
- [9] BALANIS, C.A., *Antenna theory: analysis and design.*, 4 ed. Nova Jersey. John Wiley & Sons. 2016.
- [10] MOURA, C.G. *Uso de Metamaterial em Antenas de Microfita com Supercondutor*. Tese D.Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- [11] CARNEIRO FILHO, R. *Desenvolvimento de substrato cerâmico BiNbO₄ para antenas de microfita de sistemas de comunicações sem fio*. Tese D.Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- [12] WANG, D., ZHANG, S., WANG G., *et al.* “Cold sintered CaTiO₃-K₂MoO₄ microwave dielectric ceramics for integrated microstrip patch antenas”. *Applied Materials Today*. v. 18, p. 100519, 2020.
- [13] SILVEIRA, J.H.A. *Antena com Patch Circular Confeccionada sobre substrato Dielétrico Cerâmico à base de Pentóxido de Níbio – Nb₂O₅*. Dissertação D.Sc. Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2015.
- [14] BALA, R.M. “Anupma. Characterization of graphene for performance enhancement of patch antenna in THz region”. *Optik*, v. 127, n. 4, p. 2089-2093, 2016.
- [15] PERDOMO, C.F., FIGUEROA, E.R., PAEZ, J.R. “Síntesis de BaTiO₃ Cúbico por Rutas Químicas”. *Revista Facultad de Ingeniería*. n.56, p.9-19, 2010.
- [16] ZHANG, W. FENG, Q. HOSONO, E. *et al.* “Tetragonal Distortion of a BaTiO₃/Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃ Nanocomposite Responsible for Anomalous Piezoelectric and Ferroelectric Behaviors”. *ACS omega*, v. 5, n. 36, p. 22800-22807, 2020.
- [17] STANHAUS, C. *Caracterização pelo método de Rietveld e Análise das propriedades fotoluminescentes de Hematita (α-Fe₂O₃): pura e dopada com íons Eu³⁺*. 2019. Dissertação de M.Sc. Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.
- [18] SOARES J.F.H. *Carbonização hidrotérmica para a obtenção de sistemas inorgânicos-carbono: compósitos magnéticos e carbono hidrotérmico contendo nutrientes*. Tese D.Sc. Universidade Federal do Ceará Fortaleza, 2017.
- [19] SILVA, M.S., SILVA, R.S. “A Influência De Pequenos Desvios Estequiométricos Nas Propriedades Elétricas De Cerâmicas De Titanato De Bário Sinterizadas a Laser”. In: *57º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, Curitiba, junho de 2012.
- [20] TAHIR, S., MOHAMED ARIFF, M., ALI, M., *et al.* “Factors Affecting the Porosity and Mechanical Properties of Porous Ceramic Composite Materials”. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. p.1-54, 2018.
- [21] FONSECA, M.H.F., BARBOSA, M.P.S., VILAR, Z.T., *et al.* “Estudo da Influência da Porosidade em Materiais Cerâmicos”. In: *22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais*. Natal, novembro de 2016.
- [22] BRITO, S.L.M., GOUVÊA, D. “Caracterização Superficial de Nanopartículas de BaTiO₃ preparado pelo método dos Precursores Poliméricos”. *Revista Cerâmica*. v.56. p.228-236, 2010.
- [23] SAGADEVAN, S., PODDER, J. “Investigation of Structural, SEM, TEM and Dielectric Properties of BaTiO₃ nanoparticles”. *Journal of Nano and Electronic Physics*. v.7. n.4, 2015.

- [24] SOFFIATTI, A. *Estudo da atenuação da onda eletromagnética em meios aquosos utilizando técnicas de micro-ondas*. Dissertação M.Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- [25] FERNANDES, H.C.C., SILVA NETO, A.S., BARRETO, T.S. Conformal Antennas Array for Wireless Communications at 2.5 GHz. *Journal of Communication and Computer*. v.13. n.5. p.266-269, 2016.
- [26] PAIVA, J.L.S., ANDRADE H.D.A., SOUSA M.E.T., *et al.* Relação de Desempenho Entre Antena Dipolo Comercial e Antenas Patch em Microfita Compostas por Substratos Dielétricos com Materiais Distintos Para Serviço WLAN. *Anais do Encontro de Computação do Oeste Potiguar ECOP/UFERSA (ISSN 2526-7574)*, n. 4, 2020.
- [27] DA SILVA, J.L., ANDRADE, H.D., FERNANDES, H.C.C., *et al.* “Microstrip Patch Antenna Project With Split Ring Resonator Periodically Arrayed On The Substrate”. *Microwave and Optical Technology Letters*. v.57. n.12. p.1189-1192, 2015.
- [28] SHAMIM, S.M., UDDIN, M.S.M.R., *et al.* “Design and implementation of miniaturized wideband microstrip patch antenna for high-speed terahertz applications”. *Journal of Computational Electronics*, v. 20, n. 1, p. 604-610, 2021.
- [29] ANDRADE, B.O.; MENDONÇA, L.M. Frequency invariance, gain improvement, and fast design in 3D-printed photonic band gap antennas with quadratic holes. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 61, p. 2295–2305, 2019.

ORCID

Gabriel Sá de Sena

<https://orcid.org/0000-0002-0898-7300>

Roberto Viana de Sales

<https://orcid.org/0000-0003-1062-4362>

Eduardo da Silva Gomes

<https://orcid.org/0000-0003-3584-9621>

Filipe Amaral

<https://orcid.org/0000-0002-1697-290X>

Fernando Mendes

<https://orcid.org/0000-0002-5205-8939>

Ana Angélica Mathias Macêdo

<https://orcid.org/0000-0003-4750-2721>