

# CARACTERIZAÇÃO DA CERÂMICA BSZT PARA SISTEMAS DE GERAÇÃO DE RF EM APLICAÇÕES AEROESPACIAIS\*

Gustavo Nicolau de Lima<sup>1\*</sup>, José Osvaldo Rossi<sup>1</sup>, Lauro Paulo da Silva Neto<sup>2</sup>, Rangel Claudiston Aredes<sup>2</sup>, Eduardo Antonelli<sup>2</sup>  
 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais<sup>1</sup>, São José dos Campos, SP, Brasil, UNIFESP<sup>2</sup>, São José dos Campos, SP, Brasil

**Resumo** – Linhas de transmissão não lineares (LTNLS) é uma área de pesquisa que tem sido investigada para geração de sinais de rádio frequência (RF) com aplicações em radares, plataformas móveis de defesa e satélites. Seu princípio de funcionamento baseia-se no comportamento não linear de seus elementos em função da tensão (capacitores) e/ou corrente elétrica aplicada (indutores). As LTNLS podem ser utilizadas para gerar RF ou compressão do tempo de subida de pulso de saída, dependendo das características de construção da linha e do pulso de entrada. Uma área promissora de pesquisa são as cerâmicas dielétricas de alta permissividade que apresentam um grande fator de não-linearidade quando submetidas a uma variação de tensão elétrica, o que é essencial para a construção das LTNLS. A frequência de oscilação produzida na linha depende diretamente do nível de tensão de entrada e da taxa de não linearidade do dielétrico, podendo chegar atualmente na faixa de centenas de MHz em LTNLS dispersivas discretas. Como a frequência gerada pelas LTNLS baseadas em estruturas LCs possuem uma banda larga de frequência em UHF, elas poderiam também ser utilizadas como jammers na derrubada de drones inimigos ou na perturbação das comunicações do inimigo em campo de batalha em plataforma móveis de defesa. Outra aplicação seria como aplicação nos sistemas de transmissão em Radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar - SAR*) na faixa VHF para uso em satélites ou veículos espaciais.

## I. INTRODUÇÃO

A linha de transmissão não linear (LTNL), é um modo de geração de RF investigado há décadas para atividades no meio militar. Ela é uma fonte geradora de ondas de rádio frequência (RF), a qual se baseia no comportamento não linear dos componentes quando submetidos a variação de corrente elétrica e ou tensão [1, 2]. Seus principais componentes eletrônicos não lineares são os capacitores e indutores. A linha pode operar em baixa potência, onde são empregados componentes semicondutores (varactores) como dispositivos não lineares, ou em alta potência, sendo o capacitor cerâmico utilizado como dispositivo não linear. A Fig. 1 ilustra um exemplo de uma LTNL discreta construída com capacitores variáveis.

As vantagens da tecnologia das LTNLS são o emprego de elementos passivos (diodos de capacitância variável ou componentes L e C discretos) de fácil aquisição no mercado e a redução das dimensões e de massa do sistema de geração de RF em função do uso de tais dispositivos.

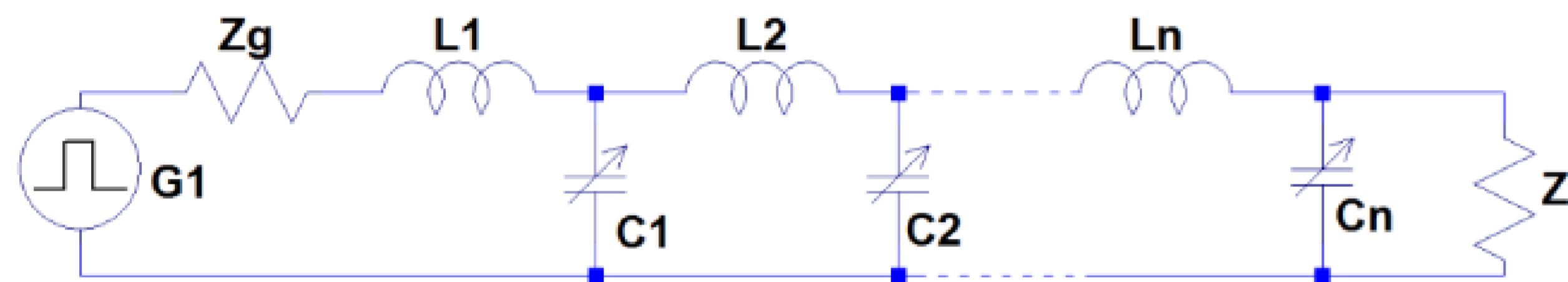


Fig. 1. Esquema básico de uma LTNL discreta com C variável.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O dielétrico mais utilizado devido à sua alta constante dielétrica é o titanato de bário ( $BaTiO_3$ ), usualmente dopado com elementos como estrôncio (Sr) para aplicações em capacitores comerciais. A dopagem tem por finalidade eliminar ou deslocar as temperaturas de transição de fase. [3]

Ao aquecer o  $BaTiO_3$  acima de sua temperatura de Curie  $T_C$  ( $120^\circ C$ ), a célula unitária apresenta uma transição de fase de uma estrutura tetragonal para cúbica, condição na qual a constante dielétrica relativa atinge o valor de pico [1], como mostra a Fig. 2. Porém, ao adicionar alguns elementos dopantes em sua estrutura, nota-se uma mudança na  $T_C$ . Com adição de 80% de estrôncio, tem-se uma mudança brusca de  $120^\circ C$  para  $-190^\circ C$  na temperatura de Curie. Entretanto, com adição de mais um elemento, como a zircônia,  $T_C$  pode alcançar a temperatura ambiente [4], [5].

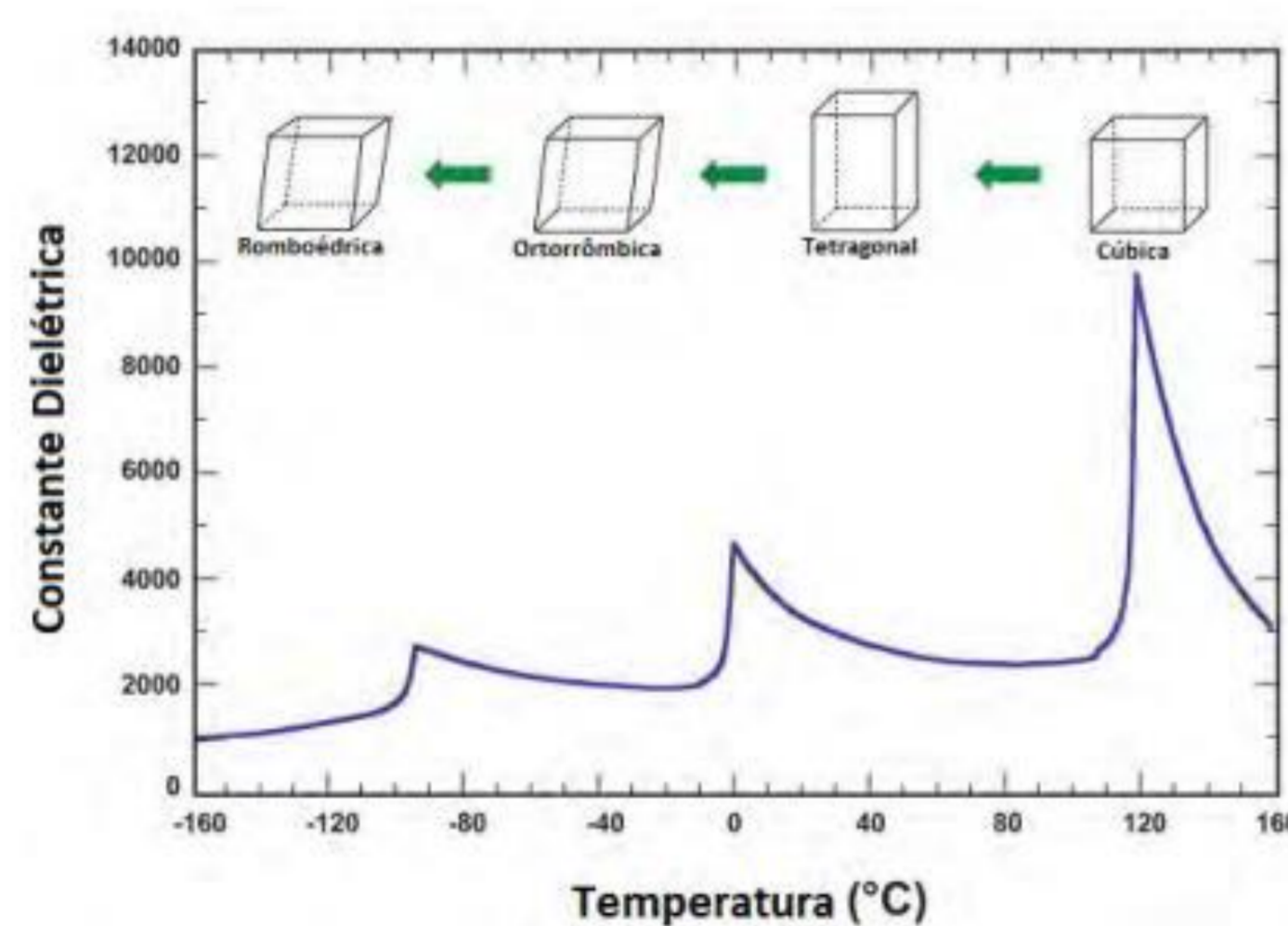


Fig. 2. Transição de fase do  $BaTiO_3$  sem dopantes.

## II. MATERIAIS

Para caracterizar a medida de capacitância em função da tensão foi utilizada uma fonte variável DC de alta tensão, conforme o aparato experimental na Fig. 3(a). A caracterização da capacitância em função da frequência utilizou um analisador de impedância RLC da marca Hioki, modelo IM3570, mostrado na Fig. 3(b).

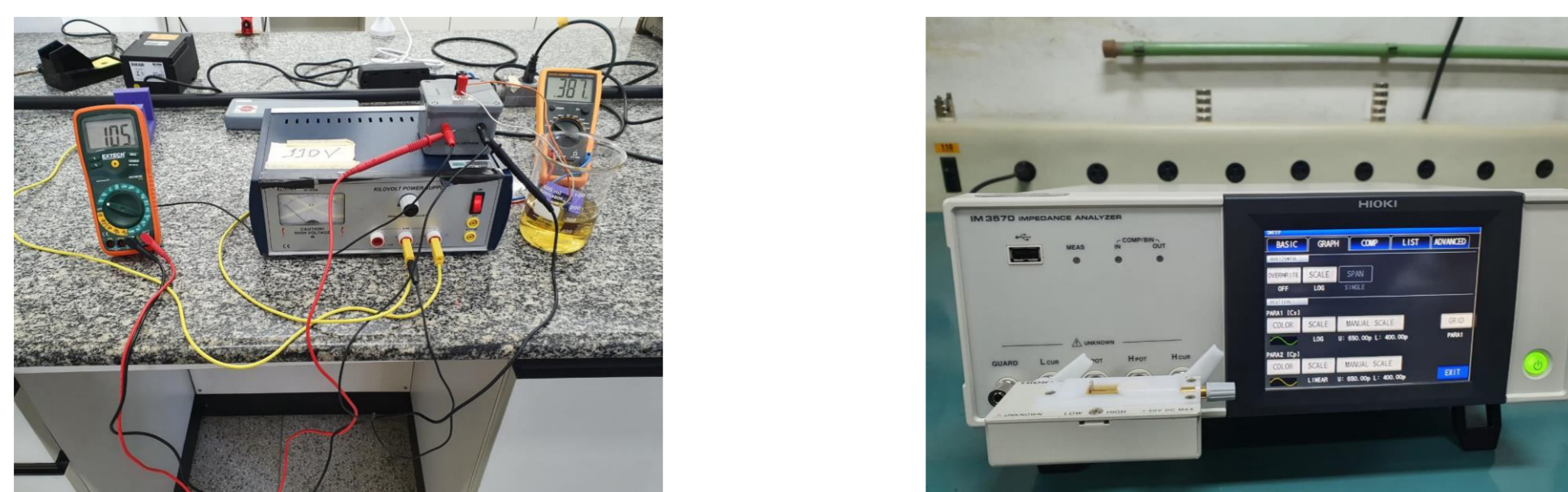


Fig. 3. Arranjo experimental de bancada: (a) medida C x V e (b) medida de C x f.

\*Funding: FAPESP 2020/04395-3  
 AFOSR/US AF no. FA9550-18-1-0111\*

## III. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Foram analisadas 3 amostras diferentes dos capacitores cerâmicos dopados com estrôncio e zircônia. A Fig. 4(a) apresenta o comportamento da capacitância das amostras em função da frequência, e a Fig. 4(b) mostra o comportamento da capacitância em função da tensão. É interessante notar que ao ultrapassar a frequência de 1 kHz, a capacitância atinge um platô praticamente sem decaimento quando se compara a região de mais baixa frequência ver (Fig. 4a). E para se obter um maior decaimento é aplicada tensão para resultar em uma maior não linearidade ou decaimento. Como as medidas C x V foram feitas com o medidor de capacitância em 1 kHz, logo, os valores obtidos de C sem polarização inicial (0 V) coincidem com os valores obtidos nas medidas de C x f quando na faixa de 1kHz na região do platô.

Na Fig. 4(b) é notado um aumento em baixas tensões devido ao alinhamento dipolar inicial. Dessa forma, como é notado nos dielétricos à base de titanato de bário, os capacitores tendem a ter uma resposta linear em baixa tensão. Isso fica mais perceptível para a amostra 20BSZT. Este efeito ocorre após o alinhamento inicial quando os dipolos atingem rapidamente o ponto de saturação, à medida que o campo elétrico aumenta, o alinhamento dos dipolos tendem a distorcer causando uma redução de C. Logo após o alinhamento linear inicial, com aumento da tensão, a capacitância atinge o pico e começa a decair. Na Fig. 5, é possível notar que a permissividade relativa correspondente de cada amostra  $\epsilon_r$  segue o mesmo perfil notado para a curva da medida da capacitância.

As amostras 05BSZT e 20BSZT apresentaram um melhor fator de não-linearidade em C x V como mostrado na tabela 1. Por outro lado, em C x f as amostras 05BSZT e 30BSZT mostraram uma alta variação de permissividade na faixa de 70% conforme a tabela 2.

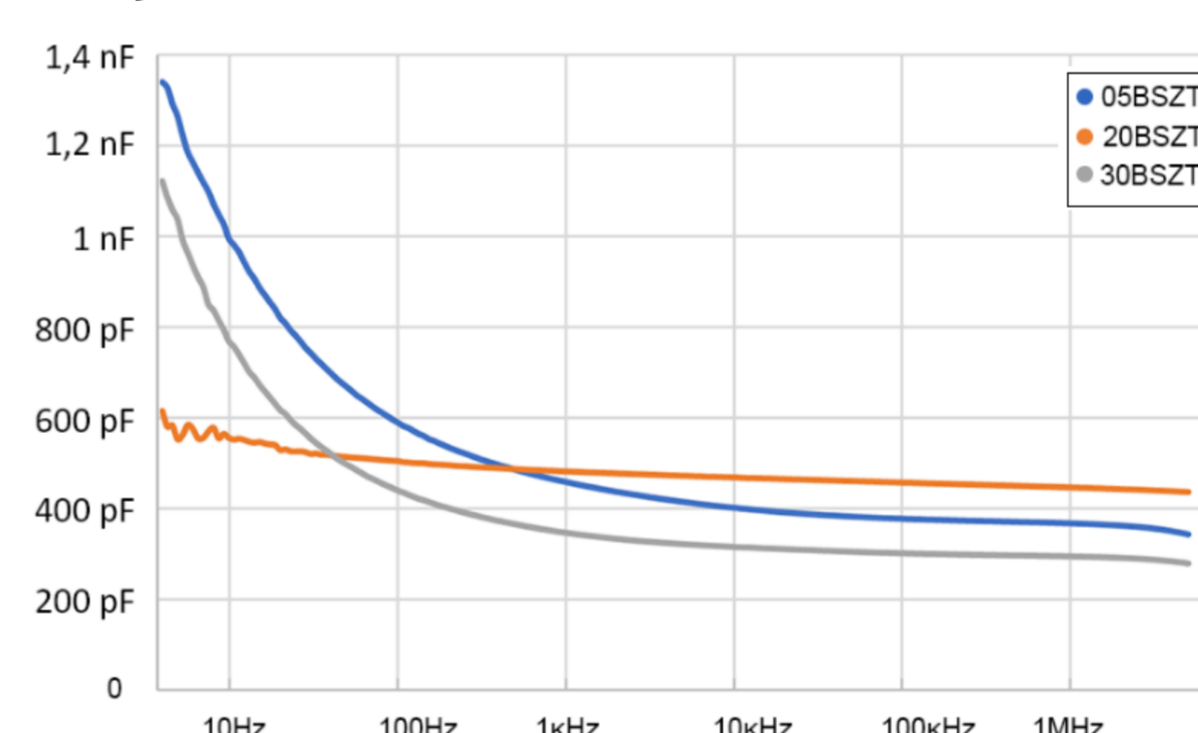


Fig. 4(a) Gráficos C x f das amostras

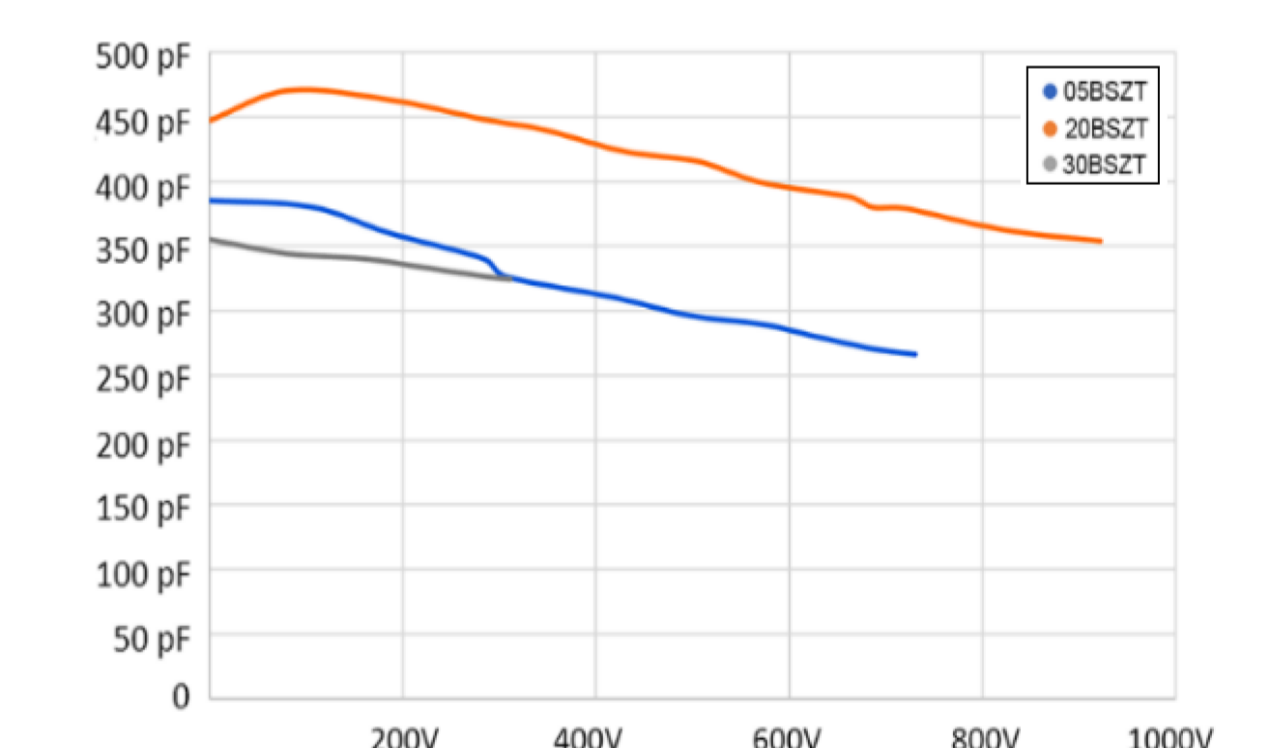


Fig. 4(b) Gráficos C x V das amostras

Tabela 1 – Fator de NL para C x V

Amostra	CxV				Fator de não-linearidade %
	C0	$\epsilon_r$	$\epsilon_r$ Pico	$\epsilon_r$ final	
05BSZT	3,85E-10	2003	2003	1384	30,91
20BSZT	4,47E-10	2887	3036	2287	24,68
30BSZT	3,55E-10	1931	1931	1762	8,73

Tabela 2 – Fator de NL para C x f.

Amostra	Cx f				Fator de não-linearidade %
	C	$\epsilon_r$	$\epsilon_r$ Pico	$\epsilon_r$ final	
05BSZT	1,34E-09	6971	6971	1783	74,43
20BSZT	6,15E-10	3972	3972	2818	29,06
30BSZT	1,12E-09	6101	6101	1516	75,16

Fig. 5 - Gráfico  $\epsilon_r$  x V das amostras

## III. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que os capacitores dopados com estrôncio e zircônia têm grande potencial de serem utilizados para LTNL para utilização de tecnologia aeroespacial, devido a sua alta não linearidade, uma LTNL pode realizar a função de amplificador e de oscilador de potência RF dentro de um sistema de telecomunicação como, por exemplo, em um SAR. O radar poderia ficar a bordo de um satélite ou aeronave, emitindo pulsos na direção do alvo, onde o eco dos pulsos emitidos seriam recebidos pela mesma antena [6]. Os sinais são processados e podem criar imagens de alta resolução do alvo. Entre as 3 amostras e os 2 experimentos, a amostra 05BSZT apresentou resultados significativos e demonstrou ser a melhor opção de escolha. Por outro lado, a amostra 30BSZT obteve a maior porcentagem de fator de não-linearidade no experimento em C x f, enquanto a amostra 20BSZT teve o segundo melhor valor de fator de não-linearidade em C x V.

## REFERÊNCIAS

- L.P. Silva Neto. Caracterização de dielétricos para sistemas de armazenamento de alta energia e de geração de RF em aplicações aeroespaciais. Dissertação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
- M.E. Kumkel, *Fundamentos e Tendências em Inovação Tecnológica*. 2ª Ed. 2021, p. 232.
- L. P. S. Neto et al. "Characterization of ceramic dielectrics for sub-GHz applications in nonlinear transmission lines," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 42, no. 10, pp. 3274–3282, Oct. 2014.
- W.D. Callister Jr., "Electrical Properties", in *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7th Edition, John Wiley, 2007, USA, pp; 702-704.
- S. Roberts, "Dielectric and piezoelectric properties of barium titanate," *Phys. Rev.*, vol. 71, no. 12, pp. 890–895, 1947.
- L.C. Silva. Geração de RF usando linhas de transmissão não lineares discretas para aplicações radar. 2020.. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2019.