

## Caracterização de Cerâmicas Dielétricas BSZT para Uso em Linhas de Transmissão Não Lineares

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

\*Aluno de Mestrado do curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais- CSE.

gustavo\_gnl@yahoo.com.br

---

**Resumo.** Linhas de transmissão não lineares (LTNLs) é uma área de pesquisa investigada devido a geração de sinais de rádio frequência (RF) com aplicações em telecomunicações militares ou civis. Seu princípio de funcionamento tem como base o comportamento não linear de seus elementos em função da tensão e/ou corrente elétrica aplicada. As LTNLs podem ser utilizadas para gerar RF ou compressão do tempo de subida do 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.

---

**Palavras-chave:** Linhas de Transmissão Não Lineares; Permissividade; Dielétrico; Capacitores; Temperatura de Curie.

## 1. Introdução

A linha de transmissão não linear (LTNL), é um modo de geração de RF investigado há décadas para atividades no meio civil e 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 [ALEXANDER, SADIKU, 2013; SILVA NETO, 2012]. Os componentes eletrônicos utilizados na construção das linhas não lineares de alta potência 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. [CALLISTER, 2020].

Em comparação com outras fontes geradoras de RF que utilizam elementos ativos como filamento aquecedor ou fontes de alta tensão, essa tecnologia tem como vantagem o emprego de elementos passivos de fácil aquisição no mercado (diodos de capacitância variável e componentes discretos, tais como indutores e capacitores cerâmicos) o que resulta na redução do tamanho e massa final do sistema RF devido ao uso de tais dispositivos. As LTNLs atuais baseadas em LC tem sua faixa de operação entre 300 MHz até 500 MHz, faixa de operação que depende muito do tipo de diodo varactor e indutor utilizado ou ainda do layout da PCB. A caracterização de novos componentes não lineares tem como objetivo alcançar a faixa de frequência de 1 GHz. Dessa forma, a linha teria diversas aplicações como em antenas usadas para telecomandos, em dispositivos espaciais ou na emissão de pulsos de radar em satélites SARs.

O capacitor é um dispositivo eletroeletrônico muito utilizado e possui diversas aplicações no campo da engenharia. Este componente é usado com mais frequência para armazenar cargas elétricas, mas ele desempenha também outras funções, por exemplo, como corretor de fator de potência em instalações elétricas, filtros, acoplador de sinal AC em fontes DC, armazenador de energia em redes formadoras de pulso (PFNs). Entre outras utilizações no campo da engenharia. [SILVA NETO, 2012] Este dispositivo é composto por duas placas de metal condutor e um material dielétrico que separa as placas, conforme mostra a Figura 1. O material dielétrico atua como isolante elétrico e pode estar na forma sólida (como papel, vidro, cerâmica, entre outros); gás (como o ar, nitrogênio, hidrogênio, entre outros); líquido (óleo mineral, óleo vegetal óleo de silicone, entre outros).

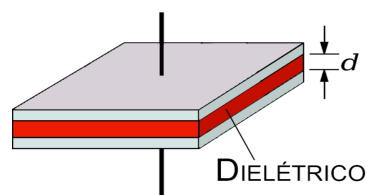


Figura 1 - Capacitor de placa paralela separado pela distância  $d$ , e um material dielétrico entre as placas

A temperatura tem grande influência nas características dos materiais dielétricos. Os materiais ferroelétricos obedecem à lei de Curie-Weiss, onde a suscetibilidade dielétrica do material varia inversamente com a temperatura, conforme Equação 1, onde  $C$  é uma constante,  $T$  é a temperatura e  $T_c$  é a temperatura de Curie que é uma característica do material. O titanato de bário devido sua alta constante dielétrica é um material muito utilizado para fabricação de capacitores cerâmicos.

$$\chi_{die} = \frac{C}{T - T_c} \quad (1)$$

Ao se elevar a temperatura acima da  $T_c$ , os dipolos elétricos ficam desordenados, ou seja, o material ferroelétrico entra na fase paraelétrica. À medida que a temperatura fica abaixo de  $T_c$ , os dipolos tendem a se alinhar na mesma direção, essa fase é conhecida como fase ferroelétrica. Ao aquecer o  $BaTiO_3$  acima de sua temperatura de Curie ( $120^\circ\text{C}$ ), sua célula que antes era tetragonal torna-se cúbica, conforme mostra a Figura 2. Porém ao adicionar alguns elementos dopantes em sua composição, nota-se uma mudança em sua  $T_c$ . [KUMKEL, 2021; ROBERTS, 1947]

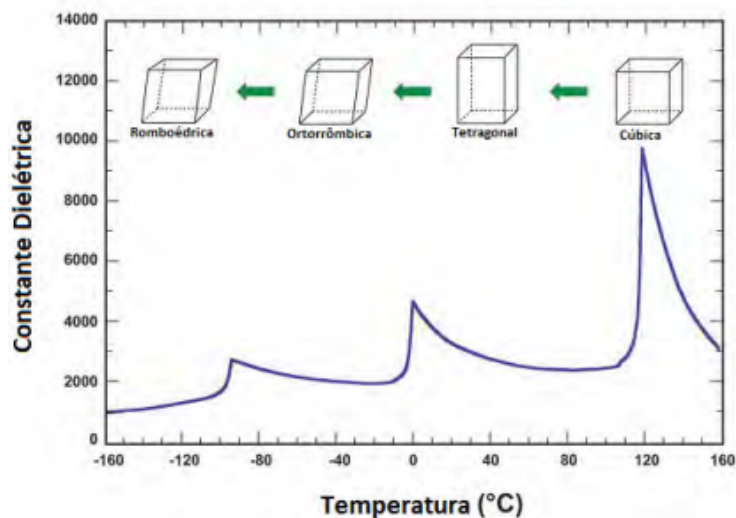


Figura 2 - Transição de Fase do Titanato de Bário [PAN, 2010].

Ao se adicionar 80% de estrôncio na amostra, é notada uma queda da  $T_c$  de  $120^\circ\text{C}$  para  $-190^\circ\text{C}$  e alguns estudos indicam que com a adição de Zircônia, a temperatura  $T_c$  pode cair para perto da temperatura ambiente. [AREDES, 2022] Este trabalho tem como finalidade caracterizar a cerâmica dielétrica BSZT, com o intuito de avaliar seu desempenho na construção de LTNLs capacitivas discretas baseadas em redes LC para uso na faixa de VHF em sistemas de transmissão RF de alta potência. A razão é que as LTNLs capacitivas baseadas em diodos de capacitância variável estão limitadas à frequência máxima de operação em 300 MHz na faixa de VHF, e operam normalmente em baixa potência por causa da pequena tensão

reversa de ruptura do diodo. Na seção a seguir é dada a metodologia para a caracterização das amostras.

## **2. Materiais e Métodos**

### **2.1 Materiais**

Pode-se descrever a sinterização como método no qual pós compactados, materiais cristalinos ou não, são tratados de forma térmica a fim de resultar em um único sólido. Após o processo de sinterização, se todos os constituintes permanecerem sólidos, o resultado será de uma sinterização em estado sólido. Para o processo de sinterização deve-se levar em conta algumas variáveis como: tempo utilizado em cada processo, temperatura de processamento, a distribuição e tamanho de partículas do pó cerâmico, a composição do sistema, incluindo aditivos e a atmosfera e controle de pressão. Desta forma, combinando densificação e crescimento de grão se chega na variação microestrutural que resulta no processo de sinterização [ANTONELLI, 2004]. Durante o processo de sinterização, o comportamento dos materiais cerâmicos está dividido em três estágios: inicial, estágio o qual decorre a formação dos contornos de grão, pescoço e arredondamentos dos poros abertos interconectados; intermediário, nesse estágio verifica-se um grande fechamento de poros e densificação, e o estágio final, que decorre um acentuado crescimento do tamanho de grão e o fechamento de poros residuais.

As amostras BSZTs foram sinterizadas na UNIFESP e elas foram dopadas com diferentes porcentagens de zircônio, correspondendo a 05%, 20% e 30% para as amostras 05BSZT, 20BSZT e 30BSZT respectivamente. Para verificar a não-linearidade das amostras BSZTs, três caracterizações elétricas foram realizadas, descritas a seguir: capacitância em função da frequência (C<sub>xf</sub>), capacitância em função da tensão (C<sub>xV</sub>) e capacitância em função da temperatura (C<sub>xT</sub>). A caracterização das amostras foi feita no INPE.

### **2.2 Caracterização em função da frequência - C<sub>xf</sub>**

Foi utilizado um analisador de impedância RLC da marca Hioki, modelo IM3570, mostrado na (Figura 3) para a medida da capacitância da cerâmica BSZT em função da frequência. Sua faixa de varredura estende-se de 4 Hz até 5MHz, com tensões DC variando entre 5 mV e 5 V. [BURKS, 1989; MAHER, 1983; STRYDOM, 1999]



Figura 3 - Analisador de impedância RLC da marca Hioki, modelo IM3570.

## 2.2 Caracterização em função da tensão contínua - CxV

Uma fonte DC de alta tensão com limite máximo em 10 kV foi usada para carregar a amostra cerâmica sob teste através de uma resistência de 20 M $\Omega$  empregada para limitar a corrente de saída da fonte. Além disso, uma alta capacitância linear (4 capacitores de 2,5 kV/40  $\mu$ F) foi usada para isolar eletricamente o medidor de capacitância de baixa da alta tensão de saída da fonte. Dessa forma, a tensão de saída da fonte foi variada para medir a capacitância da amostra em função da tensão. Um suporte é usado para sustentar a amostra e conectar ao circuito CxV. O suporte é mergulhado em óleo a fim de evitar arcos elétricos na sua superfície devido à alta tensão DC aplicada. Uma imagem do arranjo experimental na bancada é apresentada na Figura 4. [ROSSI, 2011; WILSON, 1991]

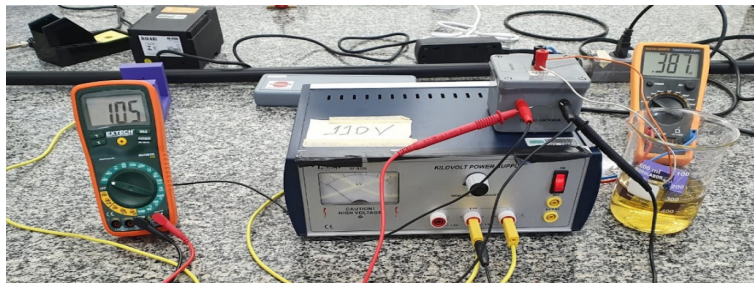


Figura 4 – Arranjo experimental para caracterização de CxV.

## 2.3 Caracterização em função da temperatura - CxT

As amostras cerâmicas passaram pelo processo de variação de temperatura controlada por um controlador de aquecimento. Um transdutor da marca Solartron modelo SI 1260 foi utilizado para obter as medidas de variação de capacitância, conforme Figura 5 [ROSSI 2010, 2013; SMITH, 2011; STRYDOM, 1999].

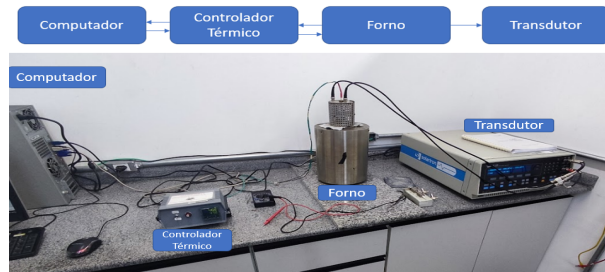


Figura 5 – Arranjo experimental para caracterização de CxT.

### 3. Resultados e Discussão

A caracterização em frequência para as três composições analisadas é apresentada na Figura 6 (a), onde se observa um decaimento da capacitância das amostras em função da frequência. Na Figura 6 (b) é apresentado o comportamento das amostras em função da tensão contínua, e novamente observa-se um decaimento da capacitância. É importante notar que os resultados significativos do decaimento de  $C$  são obtidos nas frequências abaixo de 1kHz e após ultrapassar essa frequência, a capacitância quase não decai, atingindo um platô (Figura 6 (a)). Dessa forma, para continuar explorando um aumento no decaimento de  $C$  na região de não linearidade, deve-se aumentar a tensão aplicada. Uma observação a ser feita é que o medidor de capacitância utilizado vem ajustado de fábrica para realizar as medições na frequência de 1 kHz. Consequentemente, as medidas  $CxV$  foram feitas com o medidor de capacitância em 1 kHz, e os valores obtidos de  $C$  sem polarização inicial (0 V) como apresentado na Figura 6 (b) coincidem com os valores obtidos nas medidas de  $Cxf$  quando na faixa de 1 kHz na região do platô mostrado na Figura 6 (a). Nos dielétricos à base de titanato de bário, os capacitores tendem a responder com o incremento de  $C$  em baixa tensão. Isso é notado na Figura 6 (b) com a amostra 20BSZT devido ao alinhamento dipolar inicial em baixas tensões. Após o alinhamento inicial, quando os dipolos atingem rapidamente o ponto de saturação, à medida que o campo elétrico aumenta, ocorre uma redução de  $C$ , uma vez que todos os dipolos já estão alinhados. Dessa forma, logo após o alinhamento linear inicial, a capacitância atinge o pico e começa a decair com o aumento da tensão. As amostras 05BSZT e 20BSZT apresentaram um maior fator de não-linearidade em  $CxV$  como mostrado na Tabela 1. De outra perspectiva, em  $Cxf$  as amostras 05BSZT e 30BSZT mostraram uma alta variação de permissividade na faixa de 70% conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 1 - Fator de NL para C x V

Amostra	CxV				Fator de não-linearidade %
	$C_0$	$\epsilon_r$	$\epsilon_r$ 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	Cxf				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

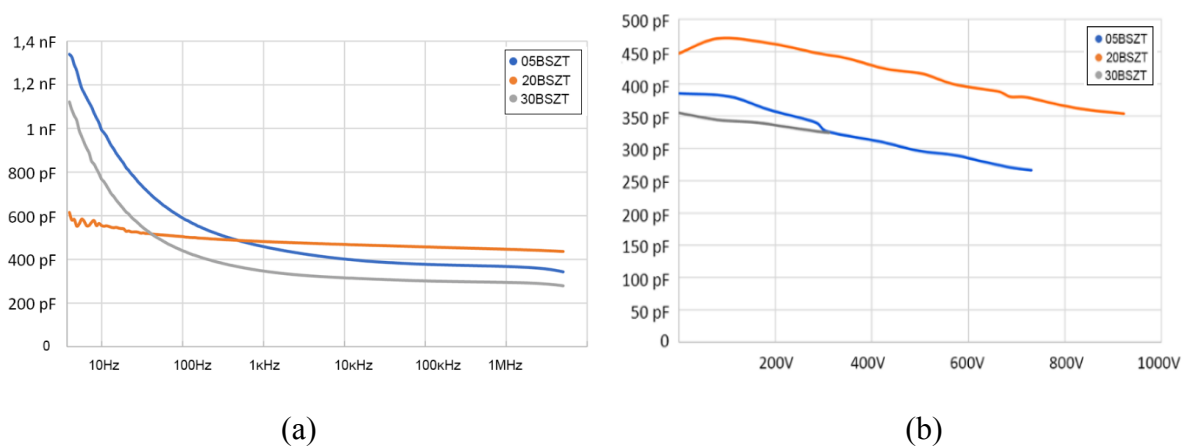


Figura 6 – Caracterização das amostras cerâmicas do tipo BSZT (a) C x f e (b) C x V.

Na figura 7(a) e (b), são observados os comportamentos das amostras 05BSZT e 20BSZT, respectivamente, da capacitância em diferentes temperaturas. Para as amostras 30BSZT, esta medida não foi realizada devido ao baixo fator de não linearidade apresentada na medida CxV. Para efeito de comparação, as curvas de Cxf em temperatura ambiente da Fig. 6(a) são reproduzidas nas Figuras 7(a) e (b) para as amostras 05BSZT e 20BSZT, respectivamente. Em ambas as amostras, podemos notar que em baixas frequências como o incremento de temperatura até 186 °C, a capacitância inicial da amostra decresce e com o aumento da frequência rapidamente um platô um pouco abaixo do valor inicial é atingido. Porém ao aumentar a temperatura, a partir da medida de 219 °C, a capacitância inicial aumenta de valor, atingindo praticamente o valor inicial de temperatura ambiente em 301 °C em ambos os casos, pois uma transição de fase é atingida neste caso. E como nos casos em mais baixa temperatura, a capacitância decresce bastante em altas frequências para ambas as amostras, segundo uma exponencial atingindo um platô acima de 1 kHz, tendo o mesmo comportamento da medida Cxf feita com o analisador RLC da Hioki. As duas amostras demonstraram uma resposta similar em relação à capacitância a partir de 1 kHz para as temperaturas na faixa de 250 °C a 301 °C. A capacitância decresce em alta temperatura pois os dipolos tendem a se orientar segundo ao campo elétrico aplicado, porém essa orientação é dificultada devido a vibração térmica dos átomos, logo, a polarização do dielétrico diminui com o aumento da temperatura resultando na diminuição da capacitância [CALLISTER, 2020], uma vez que uma transição de fase é atingida. É possível notar esta fase de transição da amostra em baixas

frequências, onde sua capacitância inicial tende ao mesmo valor até a temperatura até 186 °C, em especial na Fig. 7(a), e após essa temperatura a capacitância começa a se elevar.

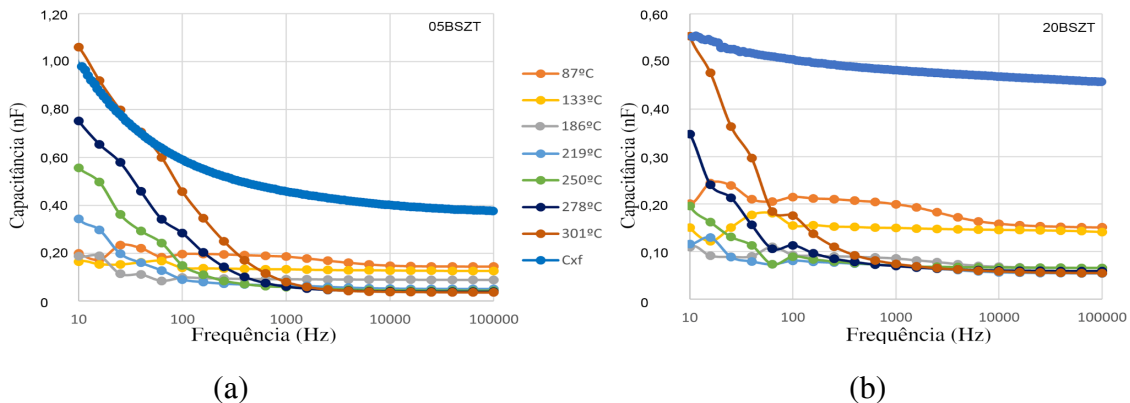


Figura 7 – Caracterização de CxT em função da frequência para as amostras (a) 05BSZT e (b) 20BSZT.

#### 4. Conclusão

Os resultados obtidos revelam que devido à sua alta não linearidade, as cerâmicas contendo zircônia e estrôncio têm potencial empregabilidade em LTNs. Entre as 3 amostras e os 3 experimentos, a amostra 30BSZT alcançou o maior fator de não-linearidade no experimento CxV, enquanto a amostra 20BSZT teve o segundo melhor valor de fator de não-linearidade em termos de CxV. Porém a amostra 05BSZT apresentou resultados relevantes e demonstrou ser a melhor alternativa entre elas, pois na medida CxV, ela apresentou o melhor resultado de não linearidade e na medida Cxf obteve um bom resultado também, apresentando um fator de não linearidade da ordem de 75 %, praticamente igual ao da amostra 30BSZT. Em relação à medida CxT, as duas amostras 05BSZT e 20BSZT apresentaram um comportamento de decréscimo de C em função da frequência em altas temperaturas, atingindo valores abaixo de 100 pF em ambos para temperaturas acima de 219 °C, demonstrando a importância de se manter o sistema resfriado para operação em alta potência ou com alta taxa de repetição para pulsos aplicados no dielétrico. Para uma caracterização mais completa em termos de vida útil da amostra, poderá ser feita a análise de weibull, que através de um teste destrutivo, é aplicada alta tensão, para se descobrir a probabilidade de falha do dielétrico.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem à FAPESP pelo financiamento do projeto de pesquisa com número 2020/04395-3, e a Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP) pela sinterização das amostras cerâmicas. O autor J.O. Rossi agradece também ao CNPq pelo suporte 306540/2019-3 e ao SOARD/USAF pelo suporte FA9550-18-1-0111. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001



## Referências

- ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 10ª ed. AMGH Editora, 2013.
- ANTONELLI, Eduardo. **Preparação e estudo de propriedades físicas de corpos cerâmicos densos do sistema Ba(Ti<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>)O<sub>3</sub>**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. doi:10.11606/D.88.2004.tde-18082015-152429. Acesso em: 2022-09-10.
- AREDES, R. G., Antonelli, E., Neto, L. P. S., Rossi, J. O., & Schamiloglu, E. (2022). Tunability Behavior of (Ba, Ca)(Zr, Ti) O<sub>3</sub> Ceramic Capacitors Powered by Thermally Induced Phase Transitions With Applications to Nonlinear Transmission Lines. *IEEE Transactions on Plasma Science*.
- BURKS, D. et al. A ceramic capacitor for AC applications. In: **Proceedings., 39th Electronic Components Conference**. IEEE. p. 194-201,1989
- CALLISTER, W. Aplicações e Processamento das Cerâmicas. In: GRUPO GEN-LTC (Ed.), **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9ª Ed. Rio de Janeiro, 2000. p. 467-497.
- KUMKEL, M. E. Caracterização de Cerâmicas para Aplicações em Linhas de Transmissões Não Lineares. In: KUMKEL, M. E.(Ed.) , **Fundamentos e Tendências em Inovação Tecnológica**. 2ª Ed. São José dos Campos-SP, 2021, p. 2-15.
- MAHER, G. A new PLZT dielectric for use in characteristic X7R multilayer ceramic capacitors. **IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology**, v. 6, n. 4, p. 372-376, 1983.
- PAN, M. -J.; RANDALL, C.A. **A brief introduction to ceramic capacitors**, **Electrical Insulation Magazine**, v. 26, p. 44-50, 2010
- ROBERTS, Shepard. **Dielectric and piezoelectric properties of barium titanate**. *Physical Review*, v. 71, n. 12, p. 890, 1947.
- ROSSI, J. O.; NETO, LP Silva; SILVA, A. R. Study of HV dielectric ceramics for applications in compact pulsed power. In: **2011 IEEE Pulsed Power Conference**. IEEE, 2011. p. 459-464.
- ROSSI, José O.; NETO, Lauro P. Silva; DE SIQUEIRA, Rafael HM. Study of the ceramic capacitor dielectric for pulsed power. In: **2013 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC)**. IEEE, 2013. p. 1-4.
- ROSSI, J. O.; SIQUEIRA, R. H. M.; SILVA NETO, L. P. Estudo da dependência da capacitância de capacitores cerâmicos comerciais com a tensão e temperatura. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS**. 2010. p. 1082-1089.

SILVA NETO, L. P.; ROSSI, J.O. **Caracterização de dielétricos para sistemas de armazenamento de alta energia e de geração de RF em aplicações aeroespaciais.** 2012. 153p. Dissertação (Mestrado em **Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais**) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

SMITH, Paul W. **Transient electronics: pulsed circuit technology.** John Wiley & Sons, 2011.

STRYDOM, J. T.; VAN WYK, J. D.; FERREIRA, J. A. Capacitor measurements for power electronic applications. In: **Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No. 99CH36370).** IEEE, 1999. p. 2435-2440.

WILSON, Colin Richard; TURNER, Miles M.; SMITH, Paul W. Pulse sharpening in a uniform LC ladder network containing nonlinear ferroelectric capacitors. **IEEE transactions on electron devices**, v. 38, n. 4, p. 767-771, 1991.