

## Incremento de la temperatura de Curie del BaTiO<sub>3</sub> mediante la adición de LaFeO<sub>3</sub> Increase of the Curie temperature of BaTiO<sub>3</sub> through LaFeO<sub>3</sub> addition

J. C. Aguirre-Espinosa<sup>a</sup>, X. J. Téllez-Tovar<sup>a</sup>, A. M. Bolarín-Miró<sup>a</sup>, M. I. Reyes-Valderrama<sup>a</sup>  
C. A. Cortés-Escobedo<sup>b</sup>, F. Sánchez-De Jesús<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.  
<sup>b</sup> Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, Instituto Politécnico Nacional, 02250, Ciudad de México, México

### Resumen

El titanato de bario, BaTiO<sub>3</sub> (BTO), es un ferroeléctrico libre de plomo con alta permitividad relativa, bajo factor de disipación y notable respuesta piezoeléctrica, empleado en capacitores, sensores y actuadores. Su baja temperatura de Curie ( $T_C \approx 120^\circ\text{C}$ ), donde pierde su polarización espontánea, limita su desempeño a temperaturas elevadas. Este estudio analizó el efecto de pequeñas adiciones de ferrita de lantano, LaFeO<sub>3</sub> (LFO) en compósitos (1-x)BaTiO<sub>3</sub>-xLaFeO<sub>3</sub> ( $x=0-0.04$ ,  $\Delta x=0.01$ ). La técnica de difracción de rayos X, permitió confirmar la formación de una solución sólida con estructura tipo perovskita tetragonal. Mediante microscopía electrónica de barrido se encontró que el tamaño de grano disminuye con la LFO, para luego incrementar progresivamente. El uso de espectroscopía de impedancia reveló un incremento de la  $T_C$  con el aumento de LFO y disminución de la permitividad relativa. Los ciclos de polarización eléctrica confirmaron la naturaleza ferroeléctrica. La incorporación de LFO incrementa la  $T_C$  del BTO conservando su fase ferroeléctrica ampliando su rango operativo en dispositivos cerámicos libres de plomo.

**Palabras Clave:** Ferroeléctrico, Temperatura de Curie, BaTiO<sub>3</sub>, LaFeO<sub>3</sub>

### Abstract

Barium titanate, BaTiO<sub>3</sub> (BTO), is a lead-free ferroelectric with high relative permittivity, low dissipation factor, and remarkable piezoelectric response, used in capacitors, sensors, and actuators. Its low Curie temperature ( $T_C \approx 120^\circ\text{C}$ ), where it loses its spontaneous polarization, limits its performance at elevated temperatures. This study analyzed the effect of small additions of lanthanum ferrite, LaFeO<sub>3</sub> (LFO), in (1-x)BaTiO<sub>3</sub>-xLaFeO<sub>3</sub> composites ( $x=0-0.04$ ,  $\Delta x=0.01$ ). X-ray diffraction confirms the formation of a solid solution with a tetragonal perovskite-type structure. Scanning electron microscopy showed that the grain size decreases with LFO, and then progressively increases. Impedance spectroscopy revealed an increase in  $T_C$  with increasing LFO and a decrease in relative permittivity. Electrical polarization cycles confirmed the ferroelectric nature of the BTO. The addition of an LFO increases the  $T_C$  of the BTO while preserving its ferroelectric phase, extending its operating range in lead-free ceramic devices.

**Keywords:** Ferroelectric, Curie Temperature, BaTiO<sub>3</sub>, LaFeO<sub>3</sub>.

### 1. Introducción

El titanato de bario, BaTiO<sub>3</sub> (BTO) es un óxido cerámico con estructura tipo perovskita ampliamente estudiado debido a sus propiedades ferroeléctricas, entre las que destaca su capacidad de exhibir polarización eléctrica espontánea reversible, bajo la acción de un campo eléctrico externo, atribuida a su estructura cristalina tetragonal la cual no presenta centrosimetría y es estable a temperatura ambiente (Adediji *et al.*, 2023). Debido a sus características, el BTO es

muy utilizado en dispositivos electrónicos tales como capacitores, transductores, sensores y actuadores, entre otros.

Uno de los aspectos más relevantes del BTO es su carácter libre de plomo, lo que lo convierte en una alternativa ambientalmente sostenible frente a materiales ferroeléctricos tradicionales como los titanatos de circonato de plomo (PZT), cuyo contenido de plomo supone un riesgo para el medio ambiente y la salud humana (Flora *et al.*, 2006). Sin embargo, el BTO presenta una limitación tecnológica, su temperatura de transición ferroeléctrica o temperatura de Curie ( $T_C$ ), que se

\*Autor para la correspondencia: fsanchez@uaeh.edu.mx

**Correo electrónico:** ag133712@uaeh.edu.mx (Julio Cesar Aguirre-Espinosa), te318299@uaeh.edu.mx (Ximena Jocelyn Téllez-Tovar), abolarin@uaeh.edu.mx (Ana María Bolarín-Miró), profe\_5490@uaeh.edu.mx (María Isabel Reyes-Valderrama), ccortese@ipn.mx (Claudia Alicia Cortés-Escobedo), fsanchez@uaeh.edu.mx (Félix Sánchez-De Jesús).

encuentra alrededor de 120 °C. A esta temperatura, el material sufre una transición estructural de fase tetragonal a cúbica, lo que provoca la pérdida de su carácter ferroeléctrico y, por ende, de su polarización espontánea, reduciendo así su rango operativo en dispositivos que requieren funcionamiento a temperaturas elevadas (Butée *et al.*, 2019).

Con el propósito de modificar la  $T_C$  del BTO, se han explorado diversas estrategias, entre las cuales destaca el dopaje en los sitios A y B de la estructura perovskita con cationes de distintos radios iónicos y valencias, con el fin de inducir distorsiones en el arreglo cristalino y, así, modificar sus propiedades ferroeléctricas. En este contexto, se ha dopado BTO con  $Zr^{4+}$  (Xu & Li, 2020),  $Hf^{4+}$  (Tian *et al.*, 2007),  $Y^{3+}$  (Tihiti *et al.*, 2023),  $La^{3+}$  (Wang *et al.*, 2022),  $Fe^{3+}$  (Jartych *et al.*, 2018) y  $Co^{3+}$  (Padilla *et al.*, 2015), entre otros, demostrando un incremento de la  $T_C$  con la adición de estos dopantes.

Otra estrategia interesante, pero menos estudiada, es la formación de compósitos con óxidos semiconductores, tal como la ferrita de lantano,  $LaFeO_3$  (LFO). Este cerámico presenta estructura ortorrómbica tipo perovskita, elevada temperatura de transición antiferroeléctrica a paraeléctrica (Néel),  $\sim 467$  °C, y comportamiento multiferroico bajo determinadas condiciones de dopaje (Félix *et al.*, 2024). Lo anterior sugiere que su incorporación al BTO podría incrementar la  $T_C$  manteniendo sus propiedades dieléctricas y ferroeléctricas.

Diversos estudios han demostrado que es posible incorporar óxidos de hierro o de lantánidos en matrices del tipo BTO con estructura tipo perovskitas, y que su efecto induce modificaciones en la celda unitaria, lo que promueve incrementos en la temperatura de Curie del BTO (Manesha *et al.*, 2024).

Con base en los antecedentes reportados, el objetivo del presente trabajo es optimizar las propiedades ferroeléctricas del BTO incrementando su  $T_C$  mediante la incorporación de pequeñas concentraciones de LFO formando compósitos  $(1-x)BaTiO_3-xLaFeO_3$ , analizando el efecto de esta adición sobre la estructura cristalina, sus propiedades dieléctricas y ferroeléctricas, con la finalidad de ampliar su rango operativo como una alternativa libre de plomo para dispositivos cerámicos electrónicos.

## 2. Desarrollo experimental

Polvos puros de BTO (Sigma-Aldrich, pureza > 99.9 %) y LFO (Sigma-Aldrich, pureza > 99.9 %) se emplearon como precursores para la obtención de los compósitos de composición  $(1-x)BaTiO_3-xLaFeO_3$ , con  $x = 0, 0.01, 0.02, 0.03$  y  $0.04$  (porcentaje en peso). Las cantidades de cada fase se calcularon en peso de acuerdo con la estequiometría requerida. Los polvos se introdujeron en viales de acero endurecido, y se sometieron a un mezclado en un molino SPEX modelo 8000D, utilizando una relación bolas-polvo de 16:1 en peso, durante 2 minutos, con la finalidad de obtener una mezcla homogénea y así garantizar la adecuada distribución de ambas fases. Es importante señalar que se seleccionó este tiempo para garantizar la formación del compósito sin difusión entre ambos componentes. Posteriormente, las mezclas resultantes fueron compactadas uniaxialmente en una prensa hidráulica empleando 1000 MPa, para obtener probetas con forma de pastillas cilíndricas con dimensiones de 10 mm de diámetro y

0.5 mm de espesor. La sinterización se realizó en atmósfera oxidante (aire) a 1200 °C durante 4 h, siguiendo las condiciones optimizadas reportadas (Reséndiz *et al.*, 2024). La caracterización cristalográfica se realizó mediante difracción de rayos X con un difractómetro marca Inel modelo Equinox 2000, empleando radiación  $CuK\alpha$  ( $\lambda=1.5419$  Å). La caracterización morfológica se realizó empleando un microscopio electrónico de barrido marca HITACHI modelo TM3030, así como, el análisis de tamaño de grano promedio se realizó con el software libre ImagenJ versión 1.54k. Las propiedades dieléctricas se evaluaron mediante caracterización eléctrica, la cual se llevó a cabo mediante un LCR HIOKI 3532-50 en un rango de frecuencias de 50 Hz a 5 MHz y temperaturas entre 25 °C y 250 °C. Los ciclos de histéresis ferroeléctrica se midieron a temperatura ambiente empleando un sistema de prueba ferroeléctrica Premier II (Radiant Technologies).

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Estructura cristalina

En la figura 1 se presentan los difractogramas de rayos X correspondientes a las composiciones del sistema  $(1-x)BaTiO_3-xLaFeO_3$  en el intervalo de 2-theta entre 20 ° y 60 °. Tal como se observa, en el difractograma correspondiente a la muestra del BTO puro ( $x=0$ ) se identifica una única fase cristalina correspondiente a la estructura tetragonal del BTO, con grupo espacial  $P4mm$  (COD # 2100859), cuyos picos más intensos se localizan alrededor de 26°, 36°, 45° y 53° de 2-theta. Los compósitos  $(1-x)BaTiO_3-xLaFeO_3$  presentan difractogramas similares, preservándose la misma fase tetragonal y el mismo grupo espacial. Asimismo, la ausencia de desplazamientos y modificaciones en el pico de mayor intensidad sugiere que la incorporación de LFO no induce variaciones en la estructura cristalina. Además, no se detectan picos adicionales atribuibles a fases secundarias (Sahoo *et al.*, 2018), lo que indica que las condiciones de síntesis permitieron la formación de una solución sólida monofásica

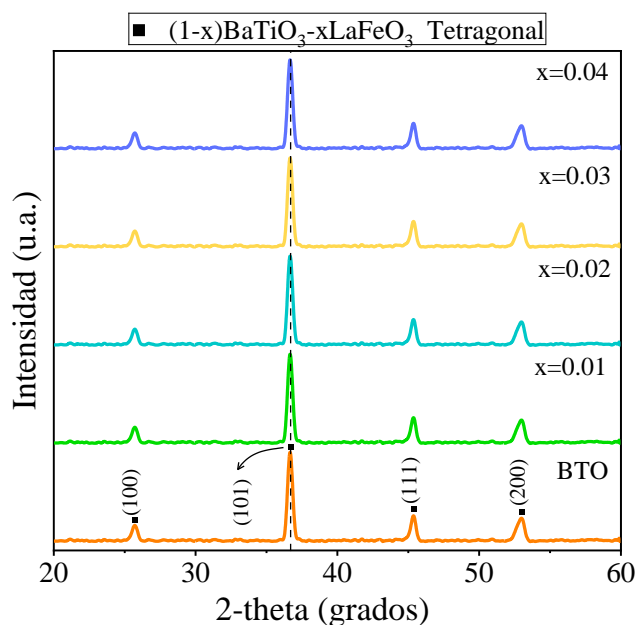


Figura 1. Difractograma de rayos X de compósitos  $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{-}x\text{LaFeO}_3$  ( $x=0\text{-}0.04$ ,  $\Delta x=0.01$ ) sinterizados a  $1200^\circ\text{C}$  durante 4h.

### 3.2. Morfología superficial de los compactos

Las micrográficas de los compactos sinterizados, obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) se muestran en la figura 2. Tal como se observa, todos los compactos presentan granos con morfología poliédrica, sin orientación particular aparente, porosidad y tamaños de grano submicrométricos, lo que indica un crecimiento limitado con las condiciones de sinterización seleccionadas. En la figura 2a se observa la morfología del BTO, una microestructura densa con baja porosidad, en concordancia con lo reportado previamente (Reséndiz *et al.*, 2024). Por otro lado, se observan variaciones en el tamaño de grano, la distribución de tamaños y la porosidad conforme aumenta el contenido de LFO. En la figura 2b se aprecian granos más pequeños y homogéneos, con morfología similar a la del BTO, junto con la presencia de partículas esféricas asociadas a la LFO, consistentes con la morfología de la ferrita de lantano pura. En la figura 2c se aprecia un aumento del tamaño de grano y la formación de aglomerados de mayor dimensión, acompañados de un aumento en la porosidad. En contraste, al incrementar la cantidad de LFO, no se evidencian diferencias significativas en lo que refiere a la morfología ni al tamaño (figura 2d). Finalmente, para el compósito con mayor cantidad ( $x=0.04$ ) de LFO (figura 2e) se aprecia un incremento de la porosidad, junto con la presencia de granos y aglomerados de mayor tamaño.

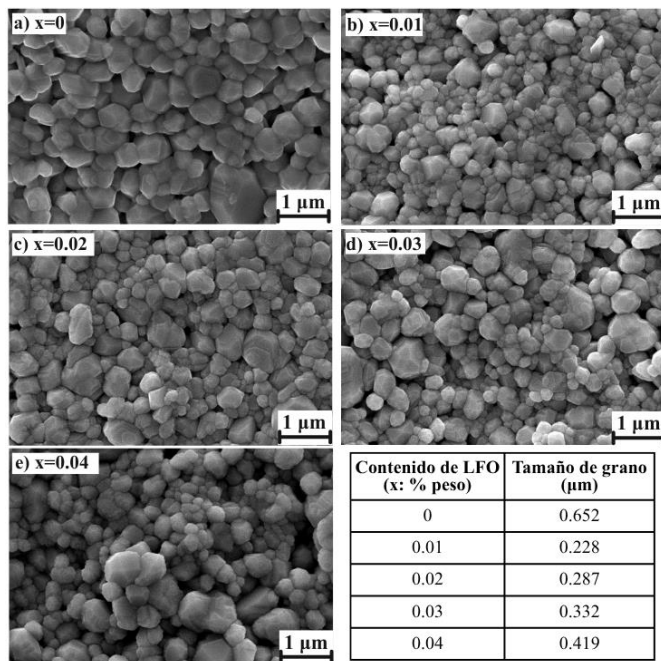


Figura 2. Micrográficas de compactos de compósitos  $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{-}x\text{LaFeO}_3$  ( $x=0\text{-}0.04$ ,  $\Delta x=0.01$ ) sinterizados a  $1200^\circ\text{C}$  durante 4h.

De la observación de la superficie de los compactos se aprecia que el tamaño de grano promedio en los compósitos tiende a incrementarse ligeramente con el aumento de la concentración de LFO, así como una mayor dispersión en la distribución de tamaños, atribuible a la presencia de esta fase.

Esta tendencia concuerda con los resultados de DRX, que muestran que la unión entre las partículas de BTO y LFO no implica un alto grado de difusión que propicie la formación de nuevas fases. Por otro lado, las diferentes características que poseen el BTO y la LFO, permiten concluir que las condiciones de sinterización seleccionadas, tiempo y temperatura de sinterización, no promovieron una difusión completa durante la sinterización, ya que sólo se observan de un modo parcial uniones o cuellos entre las partículas, lo que resulta en porosidad en el compacto.

### 3.3. Caracterización ferroeléctrica.

En la figura 3 se presentan las curvas de histéresis eléctrica obtenidas a temperatura ambiente para los compósitos  $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{-}x\text{LaFeO}_3$  ( $x=0\text{-}0.04$ ,  $\Delta x=0.01$ ), donde se aprecia el BTO puro ( $x=0$ ) con el ciclo de histéresis característico de un material ferroeléctrico con polarización máxima de  $20.11 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , una remanencia de  $10.65 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  y campo coercitivo de  $16.73 \text{ kV}/\text{cm}$ , congruente con estudios previos (Kacem *et al.*, 2022). Al introducir pequeñas proporciones de LFO,  $x=0.01$ , se observa una disminución en los valores de polarización máxima ( $10.13 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ), remanencia ( $2.43 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ) y coercitividad ( $7.25 \text{ kV}/\text{cm}$ ), conservando las características típicas de un material ferroeléctrico. Al aumentar el contenido de LFO, los ciclos de polarización eléctrica muestran un incremento progresivo en los valores de coercitividad y remanencia, alcanzando valores de  $34.90 \text{ kV}/\text{cm}$  y  $13 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , respectivamente para compósitos con  $0.04 \%$  de LFO. Estos cambios pueden atribuirse posiblemente a los defectos volumétricos como la porosidad y los distintos tamaños de grano (Shihua, *et al* 2010). La separación entre las partículas y los límites de grano constituyen barreras físicas y se requiere mayor cantidad de energía, campo eléctrico, para polarizar en ambos sentidos positivo-negativo.

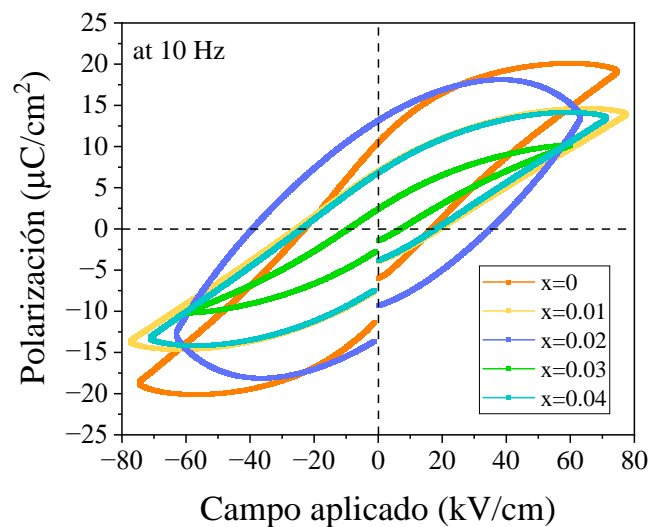


Figura 3. Curvas de histéresis eléctrica de compactos de compósitos  $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{-}x\text{LaFeO}_3$  ( $x=0\text{-}0.04$ ,  $\Delta x=0.01$ ) sinterizados a  $1200^\circ\text{C}$  durante 4 h.

### 3.4. Caracterización dieléctrica

La figura 4 muestra la permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) de los compactos sinterizados de los compósitos en el rango de frecuencia desde  $50 \text{ Hz}$  hasta  $5 \text{ MHz}$ . El BTO puro ( $x=0$ )

exhibe un valor de permitividad cercano a 1800 estable con el incremento la frecuencia. Este comportamiento característico se atribuye a la ausencia de mecanismos de polarización por carga espacial, usualmente asociados a la presencia de portadores de carga superficiales y/o defectos volumétricos (Reséndiz *et al.*, 2024). En los compósitos, los valores de  $\epsilon_r$  son menores en comparación con el BTO puro, lo que se explica por la incorporación de LFO, un material no ferroeléctrico (Aguirre *et al.*, 2025). Además, la disminución en la  $\epsilon_r$  se relaciona con factores microestructurales como la porosidad y la variabilidad en el tamaño de grano. A altas frecuencias, la composición con menor contenido de LFO ( $x=0.01$ ) presenta la mayor permitividad, atribuido a que tiene la mayor porción de fase ferroeléctrica (BTO). Adicionalmente, el efecto de la frecuencia sobre la permitividad relativa es más notable en los compósitos, lo cual se asocia a su mayor porosidad. Esta condición favorece el mecanismo de polarización de Maxwell-Wagner, que considera una polarización interfacial, acumulación de cargas en las interfaces de las fases, lo que incrementa la permitividad a bajas frecuencias (Téllez *et al.*, 2024).

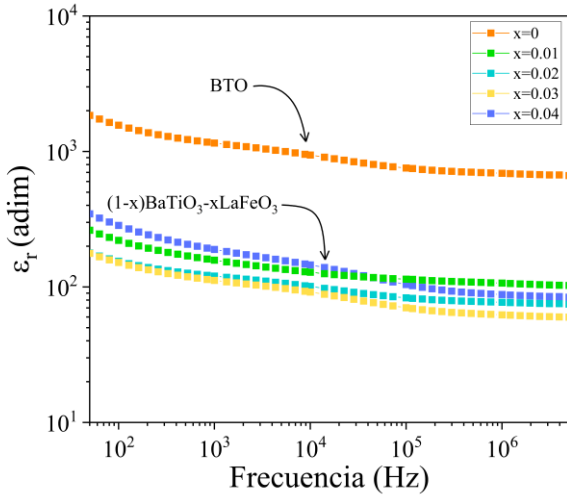


Figura 4. Permitividad relativa en función de la frecuencia desde 50 Hz hasta 5 MHz de compósitos  $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{-}x\text{LaFeO}_3$  ( $x=0\text{-}0.04$ ,  $\Delta x=0.01$ ) sinterizados a  $1200^\circ\text{C}$  durante 4 h.

### 3.5. Determinación de la temperatura de Curie

Para determinar la temperatura de Curie, se evaluó la variación de la permitividad relativa respecto a la temperatura, en el rango desde  $25^\circ\text{C}$  hasta  $250^\circ\text{C}$  a una frecuencia de 1000 Hz. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 5, donde se aprecia que el BTO puro ( $x=0$ ) exhibe un pico máximo bien definido alrededor de  $120^\circ\text{C}$  correspondiente a la transición ferroeléctrica ( $T_c$ ) en congruencia con lo reportado en la literatura (Tina *et al.*, 2024). A medida que se incrementa la proporción de LFO, el valor máximo se observa con menor definición, lo cual es una característica típica de sistemas heterogéneos, donde la coexistencia de distintas fases provoca la modificación de la  $T_c$  de un modo menos definido. Adicionalmente, se observa la disminución de la permitividad relativa al aumentar la temperatura, sin embargo, la  $T_c$  se ve desplazada a valores de temperatura por encima de  $120^\circ\text{C}$ , alcanzando un valor máximo alrededor de  $145^\circ\text{C}$  para la composición  $x=0.04$ , que podría ser efecto de la disminución

del tamaño de grano observado mediante MEB y a que la LFO mejora la estabilidad térmica del BTO.

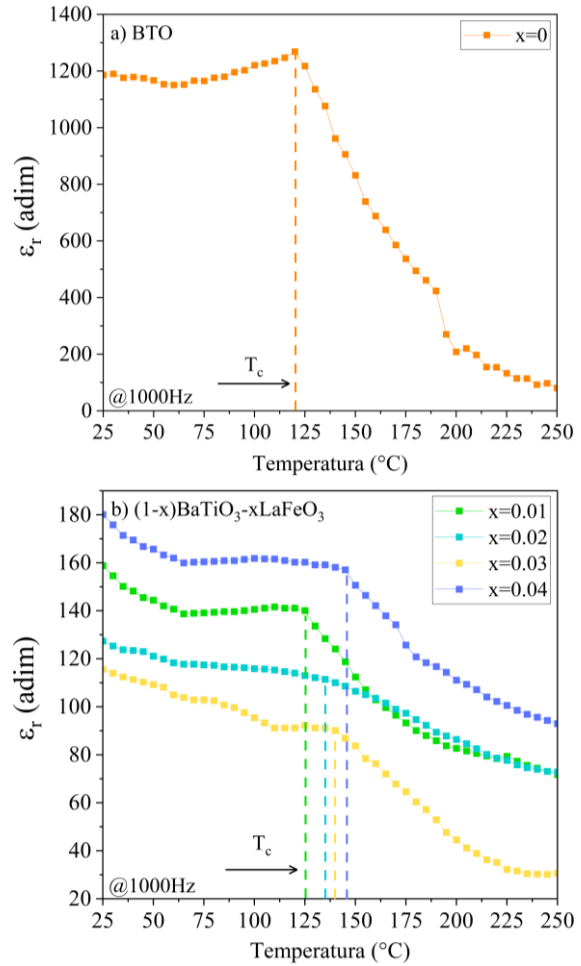


Figura 5. Permitividad en función de la temperatura de  $25$  a  $250^\circ\text{C}$  a una frecuencia de 1000 Hz de a) BTO puro ( $x=0$ ) y b) compósitos  $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{-}x\text{LaFeO}_3$  ( $x=0.01\text{-}0.04$ ,  $\Delta x=0.01$ ) sinterizados a  $1200^\circ\text{C}$  durante 4 h.

## 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que es posible incrementar la temperatura de Curie del BTO hasta  $145^\circ\text{C}$  mediante la incorporación controlada de pequeñas proporciones de LFO, sin comprometer su fase ferroeléctrica. Esta modificación, realizada con éxito mediante la síntesis de compósitos  $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{-}x\text{LaFeO}_3$  ( $x=0\text{-}0.04$ ,  $\Delta x=0.01$ ) por molienda de alta energía asistida con tratamiento térmico, permite ampliar el rango operativo del material como cerámico libre de plomo, representando un avance significativo hacia el desarrollo de dispositivos electrónicos más sostenibles y con mayor estabilidad térmica.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de México bajo el proyecto CF-2023-G-76. Adicionalmente, J. C. Aguirre-Espinosa y X. J. Tellez-Tovar agradecen a SECIHTI por la beca otorgada para la realización de sus



estudios de Doctorado en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

## Referencias

- Adediji, Y. B., Adeyinka, A. M., Yahya, D. I., & Mbelu, O. V. (2023). A review of energy storage application of lead-free BaTiO<sub>3</sub>-based dielectric ceramic capacitors. *Energy, Ecology and Environment*, 8(5), 401–419. DOI: 10.1007/s40974-023-00286-5
- Aguirre-Espinosa, J. C., Sánchez-De Jesús, F., Cortés-Escobedo, C. A., & Bolarín-Miró, A. M. (2025). Insights into the Crystal Structure and Magnetodielectric Properties of High-Energy Ball Milled Sr Substituted LaFeO<sub>3</sub>. *Materials*, 18(13), 3014. DOI: 10.3390/ma18133014
- Butee, S., Kambale, K. R., Ghorpade, A., Halikar, A., Gaikwad, R., & Panda, H. (2019). Significant improvement in Curie temperature and piezoelectric properties of BaTiO<sub>3</sub> with minimum Pb addition. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 7(4), 407–416. DOI: 10.1080/21870764.2019.1656359
- Félix-Bernabe, J. A., Téllez-Tovar, X. J., Bolarín-Miró, A. M., Cortés-Escobedo, C. A., & Sánchez-De Jesús, F. (2024). Improved multiferroic properties of lanthanum ferrites through cobalt doping. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 193, 112204. DOI: 10.1016/j.jpcs.2024.112204
- Flora, S. J. S., Flora, G., Saxena, G. (2006). Environmental occurrence, health effects and management of lead poisoning. In *Lead* (pp. 158–228). Elsevier DOI: 10.1016/B978-044452945-9/50004-X
- Jartych, E., Pikula, T., Garbarz-Glos, B., & Panek, R. (2018). Mössbauer Spectroscopy Studies of Fe-Doped BaTiO<sub>3</sub> Ceramics. *Acta Physica Polonica A*, 134(5), 1058–1062. DOI: 10.12693/APhysPolA.134.1058
- Kacem, H., Sassi, Z., Gdaiem, M. A., Dhahri, A., Seveyrat, L., Lebrun, L., & Dhahri, J. (2022). Deep understanding of structural and physical properties of BaTiO<sub>3</sub> over a broad temperature range. *Inorganic Chemistry Communications*, 144, 109771. DOI: 10.1016/j.inoche.2022.109771
- Maneesha, P., Samantaray, K. S., Baral, S. C., Mittal, R., Gupta, M. K., & Sen, S. (2024). Defect/disorder correlated modification of transport properties from hopping to tunneling processes in BaTiO<sub>3</sub>–LaFeO<sub>3</sub> solid solution. *Journal of Applied Physics*, 135(19), 194102. DOI: 10.1063/5.0195109
- Padilla-Campos, L., Diaz-Droguett, D. E., Lavín, R., & Fuentes, S. (2015). Synthesis and structural analysis of Co-doped BaTiO<sub>3</sub>. *Journal of Molecular Structure*, 1099, 502–509. DOI: 10.1016/j.molstruc.2015.07.012
- Reséndiz-Trejo, Y., Sánchez-De Jesús, F., Betancourt-Cantera, L. G., Reyes-Valderrama, M. I., Cortés-Escobedo, C. A., & Bolarín-Miró, A. M. (2024). Evidence of multiferroic behavior in sintered BaTiO<sub>3</sub> obtained from high-energy ball-milled powders. *Ceramics International*, 50(24), 53533–53543. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.10.202
- Sahoo, S., Das, S., Mahapatra, P. K., & Choudhary, R. N. P. (2018). Fabrication and characterization of LaFeO<sub>3</sub>-BaTiO<sub>3</sub> electroceramics. *Materials Chemistry and Physics*, 216, 158–169. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.05.032
- Shihua, D., Tianxiu, S., Xiaojing, Y., & Guanghua, L. (20210). Effect of grain size of BaTiO<sub>3</sub> Ceramics on Dielectric Properties. *Ferroelectrics* 402(1) 5-59. DOI: 10.1080/00150191003697377
- Téllez-Tovar, X. J., Aguirre-Espinosa, J. C., Sánchez-De Jesús, F., Cortés-Escobedo, C. A., & Bolarín-Miró, A. M. (2024). Induction of ferromagnetism in multiferroic LaFeO<sub>3</sub> by doping with Ni<sup>2+</sup>. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(20), 1406. DOI: 10.1007/s10854-024-13170-7
- Tian, H. Y., Wang, Y., Miao, J., Chan, H. L. W., & Choy, C. L. (2007). Preparation and characterization of hafnium doped barium titanate ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 431(1–2), 197–202. DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.05.037
- Tihti, M., Ibrahim, J. E. F. M., Basyooni, M. A., En-nadir, R., Belaid, W., Hussainova, I., & Kocserha, I. (2023). Development of Yttrium-Doped BaTiO<sub>3</sub> for Next-Generation Multilayer Ceramic Capacitors. *ACS Omega*, 8(9), 8448–8460. DOI: 10.1021/acsomega.2c07497
- Tina, G. A., Punetha, P., Adhikary, G. D., & Ranjan, R. (2024). Simultaneous increase in piezoelectric response and Curie point in BaTiO<sub>3</sub> based Pb-free piezoceramic. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2024.115994
- Wang, J., Lu, Z., Huang, Y., Zhou, L., Xing, Z., Wang, H., & Li, Z. (2022). The mechanism for the enhanced mechanical and piezoelectricity properties of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped BaTiO<sub>3</sub> ceramic coatings prepared by plasma spray. *Journal of Alloys and Compounds*, 897, 162944. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.162944
- Xu, Q., Li, Z. (2020). Dielectric and ferroelectric behaviour of Zr-doped BaTiO<sub>3</sub> perovskites. *Processing and Application of Ceramics*, 14(3), 188–194. DOI: 10.2298/PAC2003188X