

Síntesis y caracterización estructural
del sistema $\text{Pr}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$

Synthesis and structural characterization
of the $\text{Pr}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ system

Fredy Gonzalo Rojas Cruz^a

Julián Andrés Parra Borda^a

Ever Humberto Sáchica Castillo^{ab}

Andrés Felipe Cruz Pacheco^b

Sully Segura Peña^{ab*}

Carlos Arturo Parra Vargas^b

Fecha de Recepción: 09.7.19

Fecha de Aceptación: 11.12.19

Doi: <https://doi.org/10.19053/01217488.v11.n1.2020.8216>

Resumen

Esta investigación describe la síntesis y caracterización del sistema $\text{Pr}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18-d}$ con niveles de modificación ($x=0, 0.5, 1, 1.5, 2$ y 2.5), mediante el método de síntesis de reacción de estado sólido. Se utilizaron óxidos precursores de Pr_6O_{11} , Eu_2O_3 , BaO y CuO con purezas del (99.999 %). Se manejaron temperaturas de calcinación a 850°C , sinterización a 900°C y oxigenación a 910°C . La caracterización estructural se determinó por difracción de rayos X (DRX). Se hizo análisis estructural con refinamiento Rietveld en donde se evidencia la coexistencia de dos fases TR358 y TR123, se obtienen los parámetros de red y se logra una estructura cristalina tipo perovskita-ortorrómbica con grupo espacial $Pmmm$ (47). Se concluyó que el aumento del nivel de modificación X con Eu en el sistema $\text{Pr}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18-d}$ tiene gran incidencia en la composición porcentual de las fases y en los parámetros estructurales. El aumento o la disminución del valor de los parámetros de red en la estructura 358 y 123 se ven afectada por la mezcla de estados de oxidación del Pr con los de Eu, originando el cambio del tamaño de la celda.

Palabras claves: Caracterización, calcinación, Perovskita, Reacción de estado sólido, Refinamiento Rietveld, Sinterización.

Abstract

This research describes the synthesis and characterization of the $\text{Pr}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18-d}$ system with modification levels ($x = 0, 0.5, 1, 1.5, 2$ and 2.5). The synthesis process was achieved by solid state reaction (SSR). Precursor oxides of Pr_6O_{11} , Eu_2O_3 , BaO and CuO were used with purities up to 99.999%. Calcination temperatures were handled at 850°C , sintering at 900°C and oxygenation at 910°C . The structural characterization was determined by X-ray diffraction (XRD). A structural analysis was carried out with Rietveld refinement, where the coexistence of two phases TR358 and TR123 was evidenced. The net parameters were obtained and a perovskite-orthorhombic crystal structure with spatial group $Pmmm$ (47) was achieved. It was concluded that the increase of the X modification level with Eu in the $\text{Pr}_3\text{-XEuXBa}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18-d}$ system has a large impact on the percentage composition of the phases and structural parameters. The increase or decrease of the value of the net parameters in structure 358 and 123 is affected by the mixture of oxidation states of Pr with those of Eu, causing the cell size to change.

Keywords: Characterization, calcination, perovskite, Rietveld refinement, Sintering, Solid state reaction.

^a Grupo de Ciencias Aplicadas Tunja (GCAT), Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja-Colombia..

^b Grupo Física de Materiales (GFM). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja.

* sully.segura01@usantoto.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La superconductividad está destinada a jugar un importante papel en el desarrollo de las tecnologías emergentes, lo cual está ligada al descubrimiento de nuevos materiales. Hoy en día esta tecnología se usa en diversas aplicaciones como lo es la resonancia magnética nuclear [1], los motores superconductores [2] el transporte de energía eléctrica [3][4], detectores de luz criogénica de alta sensibilidad [5], trenes levitación magnética [6], entre otras; sin embargo, para que se haga uso comercial se requieren de condiciones especiales una de ellas es que sean asequibles y otra que trabajen a temperatura ambiente; todos los superconductores encontrados a la fecha trabajan a temperaturas muy bajas, los estudios en este campo describen que existen factores que propician la superconductividad tales como: materiales que lo componen, los tratamientos térmicos, procesos de oxigenación, métodos de síntesis, procesos de irreversibilidad y los cambios estructurales son determinantes. Es por ello que este artículo describe los procesos de la síntesis y los cambios encontrados al sustituir el Y (Itrio) por dos tierras raras (Eu y Pr) en diferentes proporciones de compuestos tipo perovskita ABX₃ del superconductor YBCO (358), siendo este el más referenciado por su alta temperatura crítica (T_c).

Los YBCO, pertenece a la familia de superconductores cerámicos, el primero en encontrarse fue YBa₂Cu₃O₇ (Y123), el cual es primer cerámico superconductor con temperatura crítica (T_c) superior a la del nitrógeno líquido (77K), los llamados superconductores de alta T_c. El sistema YBCO presenta estructura cristalina ortorrómbica y puede ser descrita como una pseudo-perovskita deficiente en oxígeno [7], [8]. En la actualidad las investigaciones de este tipo de materiales cerámicos se encaminan a la modificación de los átomos de itrio y bario con metales alcalinos, alcalineoterreos y elementos del grupo de las tierras raras para crear defectos estructurales intrínsecos los cuales aumentan la temperatura crítica de los materiales superconductores [9].

De la misma manera, la búsqueda de materiales con propiedades superconductoras a temperaturas más elevadas ha girado la investigación a materiales con estructuras complementarias a la que presenta el sistema Y123[10]. En este sentido, el sistema Y3Ba5Cu8O18 (Y358) ha aportado un significativo avance ya que presenta mayor T_c que el sistema YBACUO (123), [8] estos dos compuestos tienen estructura cristalina similar, pero tienen

diferencias en el número de cadenas CuO y planos CuO₂; el compuesto Y358 tiene cinco planos CuO₂ y tres cadenas CuO. Al aumentar el número de planos y cadenas de cobre en un sistema YBCO afecta el valor de la temperatura de transición de un material superconductor.[11]

Las propiedades superconductoras de este tipo de sistemas depende en gran medida del proceso de síntesis con el que son producidos, entre los más estudiado se encuentra los métodos de reacción de estado sólido (SSR) [12], depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD) [13] y Sol-Gel [14], siendo el método de reacción de estado sólido el más adecuado, debido a que se utilizan precursores de alta pureza que disminuyen la presencia de fases secundarias o impurezas por la alta reactividad que se origina en la molienda y en los procesos de tratamiento térmico [15].

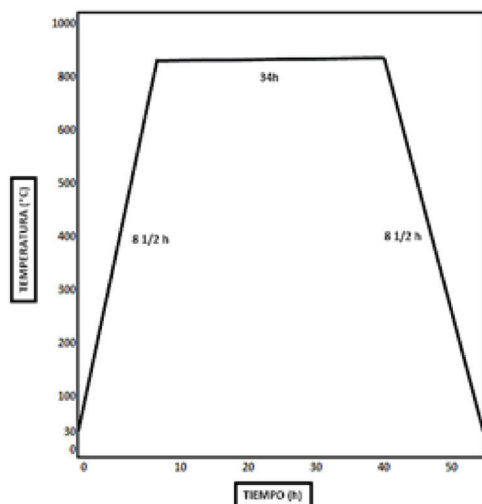
Este trabajo describe la síntesis y caracterización del sistema modificado, con base al bien descrito Y3Ba5Cu8O Y(358) al cual se le reemplaza el Itrio (Y) por Praseodimio (Pr) y Europio (Eu); teniendo así el sistema Pr_{3-x}Eu_xBa₅Cu₈O_{18-δ} con la modificaron los valores de proporciones estequiométricas (x= 0, 0.5, 1, 1.5, 2 y 2.5), mediante el método de reacción de estado sólido y posteriormente la caracterización estructural por la técnica de difracción de rayos X (DRX) y su análisis mediante refinamiento de Rietveld.

2. METODOLOGÍA

La síntesis del sistema Pr_{3-x}Eu_xBa₅Cu₈O_{18-δ} con (x= 0, 0.5, 1, 1.5, 2 y 2.5) por el método de reacción de estado sólido (SSR); se realizó un proceso de secado a 200(°C) por un periodo de 12 horas), a las muestras se sometieron al proceso de macerado por 4 horas y se sometieron diferentes tratamientos térmicos tales como, la calcinación a 850(°C) por 34 horas con una rapidez en la subida y bajada en la temperatura de 100°C/h (Fig.1), se sintetizó a 910(°C) por 44 horas con una rata de temperatura de 91°C/h y se realizó el proceso de oxigenación desde los 910(°C) hasta los 700°C con una rapidez en el descenso de la temperatura de 15°C/h, seguido, se mantuvo a los 700°C durante 33 horas para continuar con la oxigenación en un descenso de la temperatura a 12.5°C/h llegando a los 600°C donde se mantiene durante 8 horas, con el fin de tener un proceso de difusión para lograr el reajuste de la estructura por la inserción del oxígeno; finalmente,

y durante 9 horas se baja la temperatura hasta la temperatura ambiente, ver figura 2.

Figura 1. Rampa empleada en el proceso de calcinación el cual se hizo a una temperatura máxima de 850°C



Las propiedades estructurales de los sólidos sintetizados fueron caracterizadas por difracción de rayos X (DRX), con un difractómetro de ánodo de Cu (Cobre), utilizando la ley de Bragg con un rango de barrido 2θ iniciando desde 20° hasta 90° [16].

Se realizaron análisis de refinamiento de Rietveld, por medio de la comparación de patrones de difracción teóricos con experimentales utilizando los programas PowderCell2.3 (PCW) [30] y General Structure Analysis System (GSAS). [31]. El diseño de las estructuras cristalográficas se realizó con el programa VESTA [32] (Fig. 4), estos programas son de acceso libre.

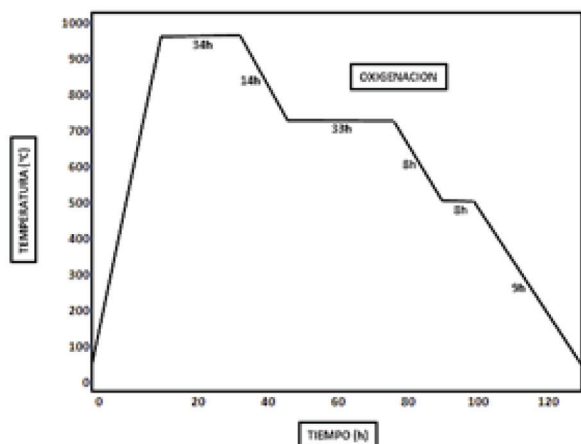


Figura 2 Rampa empleada en el proceso de oxidación del sistema $\text{Pr}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ con temperatura máxima a 910°C con incrustación de oxígeno desde 900°C a 600°C .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características cristalográficas de cada uno de los sistemas sintetizados fueron analizadas por difracción de rayos X mediante la comparación de difractogramas teóricos y experimentales con el programa PCW.

El análisis estructural de cada uno de los sistemas sintetizados se realizó con refinamiento Rietveld utilizando los datos cristalográficos teóricos de las estructuras Pr358 y Pr123, las cuales fueron descritas por Pavan y colaboradores [17], [18].

En las figuras 3 y 4 muestran los difractogramas posterior al análisis de refinamiento Rietveld para cada una de las muestras sintetizadas. Todos los sistemas presentan dos fases estructurales correspondientes a Pr358 y Pr123, el porcentaje de cada fase varía en relación a las proporciones estequiométricas. La fase Pr358 de cada una de las muestras exhibe un sistema cristalino ortorrómbico con grupo espacial $Pmmm$ (47) al igual que la fase Pr123.

En las tablas 1 y 2 se muestran los parámetros de red para cada uno de los sólidos sintetizados de las fases 358 y 123, estos parámetros son diferentes para cada sistema sinterizado.

La disminución de los parámetros de red en la estructura 358 y 123 se ve afectada por la incorporación de átomos de europio y la mezcla de estados de oxidación del Pr, originando la disminución del tamaño de la celda a medida que se incorporan átomos de europio hasta un 33%. En las muestras que se reemplazó el europio por praseodimio mayores a un 34% mostraron aumento en los parámetros de red, este fenómeno se presenta por la presencia mayoritaria de iones Pr^{3+} (1.6) [19] y Eu^{3+} (1.8) [20], [21]. Es evidente que el cambio de parámetros reticulares de la fase TR123 y TR358 presentes entre las muestras no es drástico, siendo esto un indicio de la estabilidad estructural del sistema y de la anisotropía planar $a \gg c$. [22].

Se evidencia que los sistemas $\text{Pr}_{2.5}\text{Eu}_{0.5}\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ y $\text{Pr}_{1.5}\text{Eu}_{1.5}\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ presentan impurezas de óxido de bario (Fig. 3 y 4), esto se debe a que el precursor utilizado no reaccionó adecuadamente con los tratamientos térmicos realizados. Esta impureza se encuentra en los picos de Bragg correspondientes a 2θ desde (26°) a (31°) . Se sugiere que para eliminar esta impureza se debe de aplicar tratamiento térmico

co adecuado y períodos de maceración óptimos. En las demás muestras no se manifestaron impurezas. Según Sujinnapram y colaboradores la cantidad de impurezas no tiene efecto sobre el valor del eje c que muestra la relación lineal con el número de átomos de Cu [23].

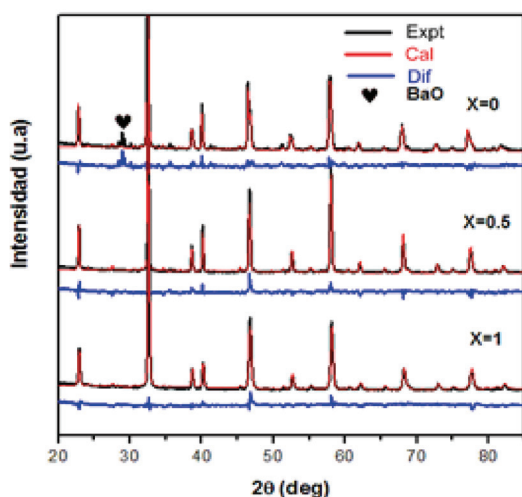


Figura 3 Patrones de difracción de rayos X refinados por Rietveld de las muestras X=0, 0.5 y 1. Experimental (Expt), calculado (Cal) y diferencia (Dif)

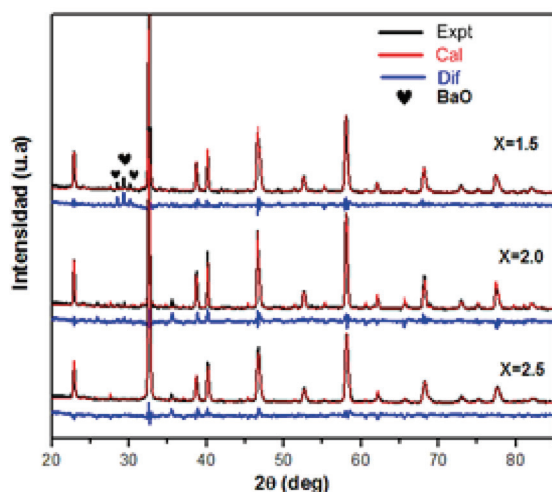


Figura 4. Patrones de difracción de rayos X refinados por Rietveld de las muestras X=1.5, 2 y 2.5. Experimental (Expt), calculado (Cal) y diferencia (Dif).

Los sistemas $\text{Pr}_{1.5}\text{Eu}_{1.5}\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ y $\text{Pr}_1\text{Eu}_2\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ presentaron mayor intensidad de pico Bragg correspondiente a 2Θ desde (57°) a (59°); este aumento se debe a la temperatura de sinterizado [24] y a la concentración de europio adicionada al sistema. La afectación del óxido de europio al sistema se da por la posición de los iones la cual se encuentra determinada en gran medida por el

estado energético y el grado de deslocalización de los orbitales de iones metálicos y de la magnitud de los términos de interacción de ambos conjuntos de ligado t_{2g} m.o con los orbitales metálicos D_{4h}; esto lo determina la configuración electrónica del óxido con el que se está dopando. Para el caso del praseodimio se tiene configuración electrónica $[\text{Xe}]6s^24f^4$ y el europio posee configuración electrónica $[\text{Xe}]6s_24f^7$ [25], [26]. La coordinación de ion Eu^{3+} c.t. (transferencia de carga) es un factor determinante. La posición de banda cambia en coordenadas cúbicas centradas en el cuerpo (BCC) en función del tamaño de la celda [20]. La intensidad de pico Bragg en la posición ($\Theta = 32^\circ$) a ($\Theta = 33^\circ$) fue máxima en todas las muestras y se evidencia que las orientaciones de los sistemas fueron similares entre sí.

La formación de la fase Tr123 es dominante en todas las muestras (Tabla 3), este fenómeno está dado por el porcentaje de europio en la composición estequiométrica. El praseodimio tiene dos estados de oxidación el europio tiene solo uno, por lo tanto, esto afecta tanto los parámetros reticulares como los porcentajes de fase presentes en cada material [27].

Tabla 1 Parámetros de red de fase TR358 para cada una de las muestras sinterizadas.

MUESTRA	PARÁMETROS RETICULARES (TR358)		
	a(Å)	b(Å)	c(Å)
Pr358 (0)	3.902	3.885	31.29
Pr358 (0.5)	3.898	3.884	31.14
Pr358 (1)	3.889	3.882	31.04
Pr358 (1.5)	3.911	3.883	31.17
Pr358 (2)	3.903	3.893	31.05
Pr358 (2.5)	3.934	3.902	31.29

Tabla 2 Parámetros de red de fase TR123 de cada una de las muestras sinterizadas.

MUESTRA	PARÁMETROS RETICULARES (TR123)		
	a(Å)	b(Å)	c(Å)
Pr358 (0)	3.928	3.913	11.682
Pr358 (0.5)	3.921	3.909	11.717
Pr358 (1)	3.911	3.885	11.657
Pr358 (1.5)	3.897	3.910	11.644
Pr358 (2)	3.907	3.899	11.636
Pr358 (2.5)	3.883	3.898	11.619

Tabla 3 Porcentajes de fase TR358 y TR123 para cada una de las muestras sinterizadas.

MUESTRA		FASE	
		TR358 (%)	TR123 (%)
Pr358	(0)	47.9	52.1
Pr358	(0.5)	49.4	50.6
Pr358	(1)	46.2	53.8
Pr358	(1.5)	46.9	53.1
Pr358	(2)	45.6	54.4
Pr358	(2.5)	41.7	58.9

Las figuras 3 y 4 muestra una comparación de los patrones de refinamiento Rietveld de todas las muestras del sistema $\text{Pr}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ a diferentes concentraciones de Eu, para este análisis se utilizó el programa GSAS. La línea negra hace referencia a los datos obtenidos experimentalmente, la línea roja hace referencia al modelo teórico (calculado), la línea azul es la diferencia entre datos experimentales y calculados y el símbolo en forma de corazón corresponde a la impureza de óxido de Bario.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que todos los patrones de XRD se han cristalizado en el grupo espacial $Pmmm$ (47) en base al material superconductor $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$. [17] Los parámetros reticulares y porcentajes de fase determinados a partir de refinamiento Rietveld se exponen en las tablas 1, 2 y 3.

En la figura 4 se presenta unas estructuras con celda tetragonal ($a \neq b \neq c$) de las fases TR358 y TR123 en donde se identificaron cupratos cuya característica estructural es una secuencia de planos paralelos de CuO_2 , estos son responsables de las propiedades eléctricas presentes en la fase superconductor. [28] Entre los planos hay variedad de capas atómicas que contienen átomos de Pr, Eu, Ba, Cu y O, los cuales actúan como una reserva de carga.

La estructura que se obtuvo de las muestras generadas del sistema $\text{Pr}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ es característica de los materiales superconductores y se destaca por presentar una pronunciada anisotropía planar, esta característica hace que la conductividad eléctrica actúe en orientación cristalina paralela con referencia a los planos de CuO_2 y es mucho mayor que en la orientación perpendicular a estas capas atómicas. [29], [28]

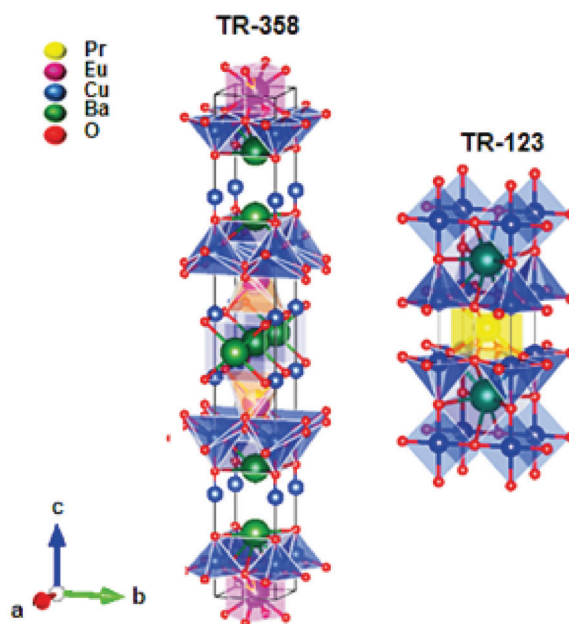


Figura 4. Celdas unitarias de perovskita Pr-358 y Pr-123 construidas a partir de los parámetros estructurales del sistema $\text{Pr}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$.

4. CONCLUSIÓN

Se demostró que es posible utilizar el método de reacción de estado sólido en la producción de muestras para el sistema $\text{Pr}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$, en donde se consigue la estructura cristalina ortorrómbica con grupo espacial $Pmmm$ (47).

El análisis por refinamiento Rietveld de las medidas de difracción de rayos X permitió verificar la coexistencia de fases correspondientes a TR123 y TR358, el sistema con mayor porcentaje de fase TR358 es $\text{Pr}_{2.5}\text{Eu}_{0.5}\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ (49.4%). Los parámetros de red no revelan diferencias importantes, menores al 2% con respecto al sistema de referencia [17]. Estos parámetros de red presentan un buen acuerdo con los valores reportados en la literatura [17]. Las muestras $\text{Pr}_{1.5}\text{Eu}_{1.5}\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ y $\text{Pr}_{2.5}\text{Eu}_{0.5}\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ manifiestan impureza de óxido de bario (BaO) en los picos de Bragg correspondientes a 2θ desde (26°) a (31°), esta impureza se puede eliminar aumentando la temperatura de sinterizado y aplicando períodos de maceración óptimos.

El aumento y disminución de los parámetros de red en la estructura cristalina del sistema $\text{Pr}_{3-x}\text{Eu}_x\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ se ve afectada por la incorporación de átomos de europio y la mezcla de estados de oxidación del Pr con los de Eu, originando el cambio de tamaño en la celda unitaria, este

fenómeno también lo determina la presencia mayoritaria o minoritaria de iones Pr^{3+} (1.6) y Eu^{3+} (1.8). Para las muestras en las que se reemplazó europio por praseodimio menor al 33% disminuyen los valores de los parámetros de red y para las muestras mayores al 34% de modificación se presenta el aumento en los parámetros de red. Es evidente que el cambio de parámetros reticulares de la fase TR123 y TR358 no es drástico, siendo esto es un indicio de la estabilidad estructural y de la anisotropía planar del sistema.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Shen *et al.*, “Optimization study on the magnetic field of superconducting Halbach Array magnet,” *Phys. C Supercond. its Appl.*, vol. 538, pp. 46–51, Jul. 2017.
- [2] B. M. O. Santos, F. Sass, and R. de Andrade, “Analysis of rotating field and induced current density in synchronous-hysteresis superconducting machine,” in *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 2018, pp. 1–5.
- [3] Z. Huang, H. S. Ruiz, and T. A. Coombs, “Pulsed field magnetization strategies and the field poles composition in a bulk-type superconducting motor,” *Phys. C Supercond. its Appl.*, vol. 534, pp. 73–81, Mar. 2017.
- [4] J. H. Schultz and G. Suján, “Superconducting Wires and Cables: High-Field Applications,” in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016.
- [5] L. Cardani *et al.*, “New application of superconductors: High sensitivity cryogenic light detectors,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 845, pp. 338–341, Feb. 2017.
- [6] F. N. Werfel *et al.*, “Bulk Superconductors in Mobile Application,” *Phys. Procedia*, vol. 36, pp. 948–952, 2012.
- [7] P. Udomsamuthirun, T. Kruaehong, T. Nilkamjon, and S. Ratreng, “The New Superconductors of YBaCuO Materials,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 23, no. 7, pp. 1377–1380, Oct. 2010.
- [8] S. Gholipour, V. Daadmehr, A. T. Rezakhani, H. Khosroabadi, F. S. Tehrani, and R. H. Akbarnejad, “Y358 against Y123 structural phase in a Y-based superconductor,” Oct. 2011.
- [9] J. A. Parra-Borda, F. G. Rojas-Cruz, A. F. Cruz-Pacheco, S. Segura-Peña, and C. A. P. Vargas, “Structural and magnetic analysis of the $\text{Pr}_{1.5}\text{Eu}_{1.5}\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ system,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 935, no. 1, p. 12005, Dec. 2017.
- [10] S. Bolat and S. Kutuk, “Fabrication of the New Y3Ba5Cu8O y Superconductor Using Melt–Powder–Melt–Growth Method and Comparison with YBa2Cu3O7–x,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 25, no. 4, pp. 731–738, May 2012.
- [11] A. Aliabadi, Y. A. Farshchi, and M. Akhavan, “A new Y-based {HTSC} with Tc above 100 K,” *Phys. C Supercond. its Appl.*, vol. 469, no. 22, pp. 2012–2014, 2009.
- [12] A. P. Garcés, Mariño, “Películas gruesas superconductoras de YBCO para conductores recubiertos,” *MOMENTO*, vol. 0, no. 31, pp. 45–54, Jul. 2005.
- [13] K. D.-B. S. López-Romero, S. J. Castillo-Mendoza, J. Chávez-Ramírez, “Síntesis y Caracterización Óptica, Eléctrica y Estructural de Películas Delgadas de CS2 Depositadas por el Método PECVD,” *Matéria*, vol. 8, pp. 341–349, 2003.
- [14] Juan Feijóol* ; Ana María Osorio2* ; Ángel Bustamante1 ; Luis de los Santos Valladares1 ; Amado Castro2 ; María H. Carhuancha2 ; Rosa Aguirre2, “Caracterización del cerámico superconductor $\text{CaLaBaCu}_3\text{O}_{7-\delta}$ obtenido por el método Sol-Gel,” *Rev. la Soc. Química del Perú*, vol. 73, no. 4, pp. 208–214, 2007.
- [15] Molecular Diversity Preservation International. and Multidisciplinary Digital Publishing Institute., *Materials*. Molecular Diversity Preservation International, 2008.
- [16] “Difractometría de rayos X.” [Online]. Available: <http://ciencias.bogota.unal.edu.co/departamentos/fisica/servicios-de-extension/laboratorios-y-taller/difractometria-de-rayos-x/>. [Accessed: 09-Jul-2018].
- [17] S. Pavan Kumar Naik, M. Santosh, and P. M. Swarup Raju, “Structural and Thermal Validations of Y3Ba5Cu8O18 Composites Synthesized via Citrate Sol-Gel Spontaneous

- Combustion Method,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 31, no. 5, pp. 1279–1286, May 2018.
- [18] A. Tavana and M. Akhavan, “How Tc can go above 100 K in the YBCO family,” *Eur. Phys. J. B*, vol. 73, no. 1, pp. 79–83, Jan. 2010.
- [19] E. Y. Wong, “Configuration Interaction of the Pr³⁺ Ion,” *J. Chem. Phys.*, vol. 38, no. 4, pp. 976–978, Feb. 1963.
- [20] H. E. Hoefdraad, “The charge-transfer absorption band of Eu³⁺ in oxides,” *J. Solid State Chem.*, vol. 15, no. 2, pp. 175–177, Oct. 1975.
- [21] P. Boutinaud, E. Tomasella, A. Ennajdaoui, and R. Mahiou, “Structural characterization and luminescent properties of CaTiO₃:Pr³⁺ thin films deposited by radio frequency sputtering,” *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 4, pp. 2316–2321, Dec. 2006.
- [22] I. S. García *et al.*, “Síntesis y propiedades estructurales del sistema superconductor La_{1,5+x}Ba_{1,5+x-y}CayCu₃Oz. (Synthesis and Structural Properties of La_{1,5+x}Ba_{1,5+x-y}CayCu₃Oz Superconductor System.),” *Cienc. EN Desarro.*, vol. 4, no. 2, pp. 27–32, Jun. 2014.
- [23] S. SUJINAPRAM, P. UDOMSAMUTHIRUN, T. KRUAEHONG, T. NILKAMJON, and S. RATRENG, “XRD spectra of new YBaCuO superconductors,” *Bull. Mater. Sci.*, vol. 34, no. 5, pp. 1053–1057, Aug. 2011.
- [24] S. P. K. Naik and M. Santosh, “Superconducting Performance, Structure, Microstructure, and Trapped Field of Top-Seeded Melt-Processed Bulk Y₃Ba₅Cu₈O_x,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, pp. 1–7, Feb. 2018.
- [25] E. Sarantopoulou, Z. Kollia, and A. . Cefalas, “YF₃:Nd³⁺, Pr³⁺, Gd³⁺ wide band gap crystals as optical materials for 157-nm photolithography,” *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 18, no. 1, pp. 23–26, Oct. 2001.
- [26] G. Hai, Q. Yanmin, X. Zhang, Y. Xiao, and C. Yan, “Photoluminescent properties of Sr₂SiO₄:Eu³⁺ and Sr₂SiO₄:Eu²⁺ phosphors prepared by solid-state reaction method,” *J. Rare Earths*, vol. 27, no. 2, pp. 323–326, 2009.
- [27] F. M. Jaime Gallego^{1,2}, Germán Sierra³, Carlos Daza⁴, Rafael Molina⁴, Joël Barrault², Catherine Batiot-Dupeyrat², “Reformado de metano en seco utilizando perovskitas La_{1-x}XAXNiO₃ y LaNi_{1-x}XBxO₃ (A: Ce ó Pr y B: Co ó Mg) como precursores del catalizador,” *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 52, pp. 9–18, 2010.
- [28] A. E. Y. Shiohara, “Crystal growth of bulk high-Tc superconducting oxide materials - PDF Free Download,” *0927-796X/97/\$32.00q1997 Elsevier Sci. S.A. All rights Reserv. Sci. Eng.*, vol. 19, pp. 1–86, 1997.
- [29] A. M. Morales Rivera, J. A. Gómez Cuaspuud, C. A. Parra Várgas, and M. H. Brijaldo Ramirez, “Synthesis and Characterization of LaBa₂Cu₃O_{7-δ} System by Combustion Technique,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 29, no. 5, pp. 1163–1171, May 2016.
- [30] W. Kraus, G. Nolze, *J. Appl. Crystallogr.* 29 (1996) 301.
- [31] AC Larson y RB Von Dreele, “Sistema de Análisis de Estructura General (GSAS)”, Informe de Laboratorio Nacional de Los Alamos LAUR 86-748 (1994).
- [32] K. Momma and F. Izumi, “VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data,” *J. Appl. Crystallogr.*, vol. 44, no. 6, pp. 1272–1276, Dec. 2011.