

## Concentradores Solares Luminiscentes Solar Luminescent Concentrators

V. H. Hernández Pérez<sup>a,\*</sup>, M. J. Galán Luna<sup>a</sup>, A. Garrido Hernández<sup>b</sup>, A. García Murillo<sup>a</sup>, F. de J. Carrillo Romo<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, C.I.I.T.E.C., 02250, Ciudad de México México.

<sup>b</sup> Universidad Tecnológica de Tecámac, División Químico Biológicas, 55740, Tecámac, Estado de México, México.

### Resumen

Este trabajo consiste en la obtención de un sistema de absorción de radiaciones electromagnéticas, desde ultravioleta hasta infrarrojo. El sistema consta de tres diferentes películas de TiO<sub>2</sub> dopado con europio, plata y manganeso. Las películas se elaboran mediante sol-gel a partir de isopropóxido de titanio, ácido acético y etanol como precursores y nitrato de europio, cloruro de plata y sulfato de manganeso como sales dopantes. Posteriormente, se depositan mediante “recubrimiento por inmersión” sobre sustratos de sílice con un tratamiento térmico de las películas y polvos obtenidos a temperaturas de 400, 500 y 600 °C. La evaluación de los polvos obtenidos se realiza mediante FT-IR, donde se observan los principales enlaces del TiO<sub>2</sub> así como los enlaces entre este y los iones, microscopía electrónica de barrido, donde se observa una morfología de partícula accidentada y tamaño micrométrico, y difracción de rayos X, donde se observa la presencia de la fase anatasa en las muestras posteriores al tratamiento térmico.

### Palabras Clave:

Concentradores-solares, Sol-Gel, Recubrimiento por inmersión, Luminiscencia.

### Abstract

This study consists in the realization of an electromagnetic radiation absorption system from ultraviolet to infrared. This system consists of three different films of doped TiO<sub>2</sub> with europium, silver and manganese ions. The films are made by sol-gel from titanium isopropoxide, acetic acid and ethanol as precursors and europium nitrate, silver chloride and manganese sulphate as doping salts. Subsequently, the “Dip-coating” technique is used to be deposited on silica substrates, with a thermal treatment of the films and powders obtained at temperatures of 400, 500 and 600 °C. The evaluation of the obtained powders is carried out by FT-IR, where the main bonds of the TiO<sub>2</sub> are observed as well as the links between this and the ions, scanning electron microscopy, where there is a morphology of an accidental and micrometric particle and X-ray diffraction, where the presence of the anatase phase is observed, in the samples after the heat treatment.

### Keywords:

Solar-Concentrators, Sol-Gel, Dip-Coating, Luminescence.

## 1. Introducción

El desarrollo de tecnología para la obtención de energía eléctrica obtenida de fuentes renovables como lo es la eólica o solar lleva a la utilización de nuevos dispositivos que permitan el mejor aprovechamiento de estas. Para la energía solar, se han llevado a cabo diversas invenciones para la obtención de energía eléctrica; uno de estos dispositivos son las celdas solares, que mediante la aplicación del efecto fotovoltaico, permite la conversión de energía lumínica a energía eléctrica, siendo todo ello por medio de la excitación de electrones gracias a la absorción de fotones que viajan a través de la luz (Dienel y col., 2010).

Sin embargo, debido a su baja eficiencia se han diseñado diversas soluciones que pueden resolver esta problemática, una de estas soluciones ha sido la de diseñar nuevos materiales como lo son el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) y la perovskitas (BaTiO<sub>3</sub>) (Beeldens, 2006). No obstante, otra solución propuesta que ha tomado fuerza en los últimos 30 años ha sido la de utilizar un dispositivo complementario a la celda solar conocido como concentrador solar (Debije & Verbunt, 2012).

Los concentradores solares permiten la absorción directa de fotones y su posterior distribución a las celdas solares mediante la aplicación de guías de onda adaptadas en diversas formas, las cuales permitirían optimizar la eficiencia de producción de energía eléctrica (Jelle y col., 2012).

\*Autor para la correspondencia: hernandezp1900@alumno.ipn.mx

Correo electrónico: hernandezp1900@alumno.ipn.mx (V. H. Hernández Pérez), mgalan1900@alumno.ipn.mx (M. J. Galán Luna), ari\_teogh@hotmail.com (A. Garrido Hernández), angarciam@ipn.mx (A. García Murillo), fcarrillo@ipn.mx (F. J. Carrillo Romo)

En años recientes se han utilizado nuevos materiales para el diseño de estos dispositivos entre los que destacan los materiales luminiscentes, los cuales, gracias a sus propiedades como disminución del Band Gap los hacen idóneos para su aplicación dentro de estos dispositivos que ahora son conocidos como concentradores solares luminiscentes. Estos concentradores solares se basan en la utilización de una película sobre un sustrato que tendrá la función de permitir el acceso de los fotones, pero no permitirá la salida de la mayoría de ellos. (Krumer y col., 2017).

Para este estudio se realiza el diseño de un concentrador solar luminiscente a base de  $\text{TiO}_2$  dopado con diferentes iones tales como europio, plata y manganeso ( $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Ag}^+$  y  $\text{Mn}^{2+}$ ) que permitan la mejora de las propiedades de absorción de fotones de la matriz de  $\text{TiO}_2$ . Para su obtención se implementa la técnica de síntesis por sol-gel debido a sus grandes posibilidades en obtención de diferentes productos como los son polvos y películas que serán idóneas de aplicar dentro de una guía de onda para el desarrollo de un concentrador solar luminiscente.

## 2. Procedimiento experimental

### 2.1 Síntesis de polvos y películas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ )

Para la síntesis de  $\text{TiO}_2$  se disuelven  $1.09 \times 10^{-2}$  mol de isopropóxido de titanio  $\{\text{Ti}(\text{OCH}(\text{CH}_3)_2)_4\}$  en etanol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) y se mantiene en agitación.

Posteriormente se añade ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) y se agita nuevamente.

Finalmente se separan dos muestras cada una de las soluciones, las cuales serán para el proceso de obtención de películas y polvos, para ello se coloca la mitad en un proceso de secado con una temperatura de  $100^\circ\text{C}$  para la obtención de un xerogel seguido de un macerado para obtener polvos y colocarlos en un tratamiento térmico de  $400^\circ$  hasta  $600^\circ\text{C}$ , para la definición de la estructura cristalina.

### 2.1 Síntesis de polvos y películas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) dopadas con europio (Eu), plata (Ag) y manganeso (Mn)

Para el dopaje de los diferentes iones de  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Ag}^+$  y  $\text{Mn}^{2+}$  con el dióxido de titanio se disuelven  $1.09 \times 10^{-2}$  mol de isopropóxido de titanio  $\{\text{Ti}(\text{OCH}(\text{CH}_3)_2)_4\}$  en etanol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) y se mantiene en agitación.

Una vez homogenizada la solución se agregan los iones dopantes de  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Ag}^+$  y  $\text{Mn}^{2+}$  en una relación de 3% de concentración en relación con el peso inicial del isopropóxido de titanio utilizando como precursores nitrato de europio, nitrato de plata y óxido de manganeso, respectivamente (Vargas Hernández y col., 2017).

Posteriormente se continuó con el proceso en cada una de las muestras por separado, siendo que se añadió ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) y se agita.

Finalmente se separan dos muestras de cada una de las soluciones, las cuales serán para el proceso de obtención de películas y polvos, para ello se coloca la mitad a secado con una temperatura de  $100^\circ\text{C}$  para la obtención de un xerogel seguido de un macerado para obtener polvos y colocarlos en un tratamiento térmico de  $400^\circ$  hasta  $600^\circ\text{C}$ , para la definición de la estructura cristalina.

La segunda muestra que se separó de cada solución se lleva a un proceso de formación de películas con ayuda de la técnica de inmersión "Dip Coating".

## 3. Resultados

### 3.1 Espectrofotometría Infrarroja por la transformada de Fourier

A continuación se presentan los resultados por la caracterización de Espectroscopia Infrarroja por la Transformada de Fourier (FT-IR) se utilizó un espectrofotometría Hitachi 1500.

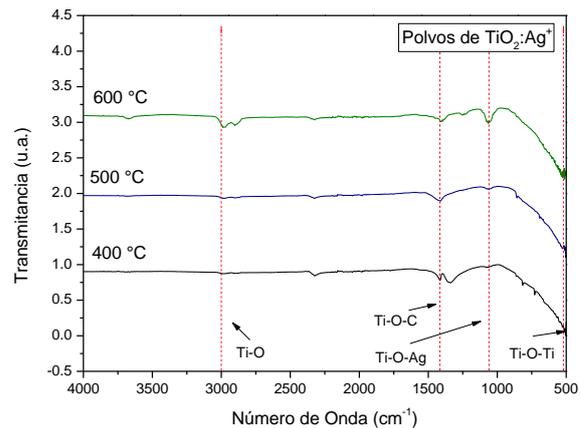


Figura 1: Caracterización FT-IR de polvos de  $\text{TiO}_2:\text{Ag}^+$

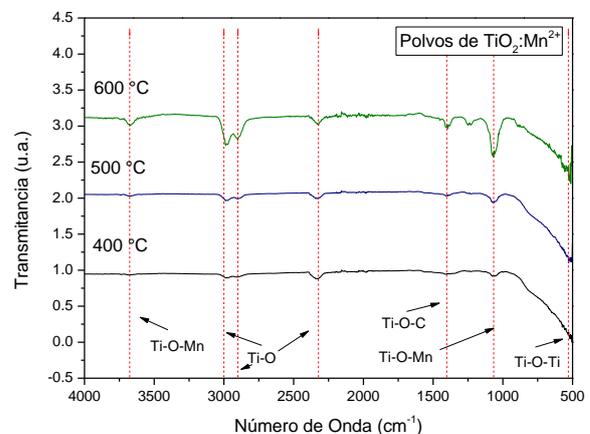


Figura 2: Caracterización FT-IR de polvos de  $\text{TiO}_2:\text{Mn}^{2+}$

En las Figuras 1, 2 y 3 se pueden observar los diferentes enlaces propios de la matriz de dióxido de titanio así como los enlaces pertenecientes a los diferentes dopajes como a  $3000\text{ cm}^{-1}$  se observa la banda de Ti-O, a  $1400\text{ cm}^{-1}$  se presenta la banda de Ti-O-C y a  $650\text{ cm}^{-1}$  la banda de Ti-O-Ti pertenecientes a la matriz de  $\text{TiO}_2$ .

Sin embargo, se presentan otras bandas características de los enlaces entre la matriz con el ion dopante como se puede notar en la imagen 1 a la distancia de  $1100\text{ cm}^{-1}$  se observa la banca Ti-O-Ag perteneciente al dopaje con de la matriz de  $\text{TiO}_2$  con el ion  $\text{Ag}^+$ , en la imagen 2 a la distancia de  $1150$  y  $3700\text{ cm}^{-1}$  se pueden observar las bandas de Ti-O-Mn perteneciente al dopaje de la matriz de  $\text{TiO}_2$  con el ion  $\text{Mn}^{2+}$  y finalmente en la imagen 3, a  $1200\text{ cm}^{-1}$  se observa la banda de

Ti-O-Eu perteneciente a la banda de la matriz de TiO<sub>2</sub> dopada con el ion Eu<sup>3+</sup>.

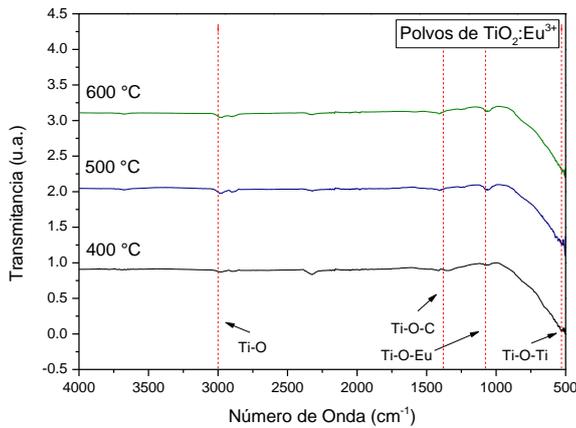


Figura 3: Caracterización FT-IR de polvos de TiO<sub>2</sub>: Eu<sup>3+</sup>

### 3.2 Difracción de Rayos X

En esta parte se presentan los resultados obtenidos por la caracterización por difracción de rayos X (DRX), para los cuales se utilizó un difractómetro ECOD8 Advance Brucker utilizando una radiación de Cu y se obtuvieron con patrones de 20-80° (2θ) mediante un tamaño de paso de 0.02°.

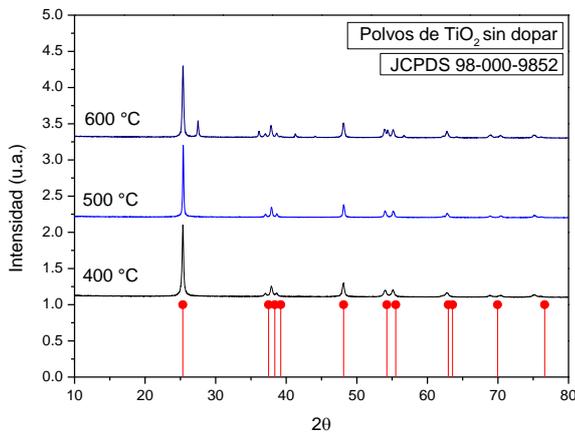


Figura 2: Caracterización DRX de polvos de TiO<sub>2</sub>

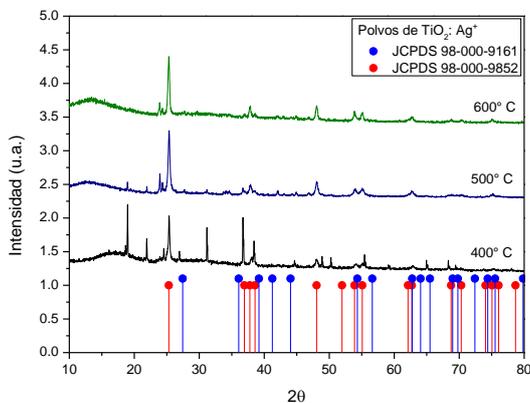


Figura 3: Caracterización DRX de polvos de TiO<sub>2</sub>: Ag<sup>+</sup>

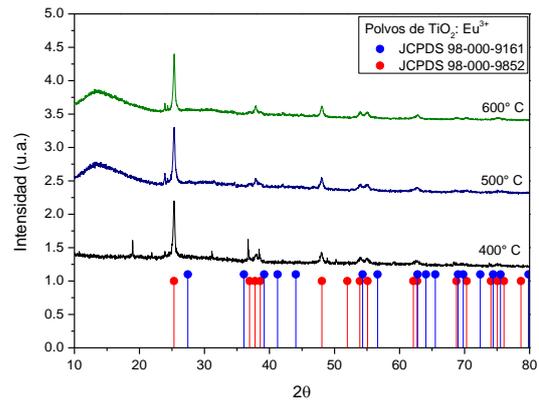


Figura 4: Caracterización DRX de polvos de TiO<sub>2</sub>: Eu<sup>3+</sup>

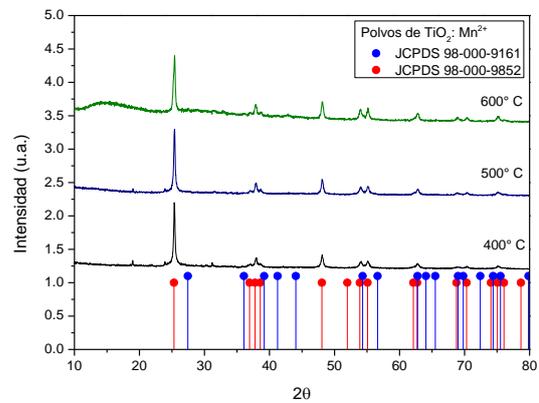


Figura 5: Caracterización DRX de polvos de TiO<sub>2</sub>: Mn<sup>2+</sup>

Los difractogramas de rayos X mostrados en las Figuras 4, 5, 6 y 7 representan las muestras no dopadas y dopadas con los iones de Eu<sup>3+</sup>, Ag<sup>+</sup> y Mn<sup>2+</sup>, estos gráficos muestran picos atribuibles en gran parte de la estructura a la fase anatasa de acuerdo a la carta JCPDS 98-000-9852 y algunos otros pertenecientes a la fase rutilo. Esto en un intervalo de 96.8 a 98.2% de estructura correspondiente a la fase anatasa y de 1.8 a 3.2% correspondiente a la fase rutilo de acuerdo a la carta JCPDS 98-000-9161, esto calculado mediante el refinamiento Rietveld, teniendo como pico principal de la fase anatasa a 25.35° sobre el eje de 2θ, además de que la fase anatasa es la que presenta el mayor intervalo de absorción en el espectro ultravioleta, esto demostrado por diversos autores a lo largo del estudio del TiO<sub>2</sub>.

Además de ello los resultados obtenidos sugieren que los iones dopantes se encuentran en la estructura del TiO<sub>2</sub> debido a la diferencia de radios iónicos de la matriz de TiO<sub>2</sub> y de los iones dopantes los cuales poseen un radio iónico pequeño, por lo cual es difícil encontrar una deformación en la red del TiO<sub>2</sub>.

### 3.3 Microscopia Electrónica de Barrido

En esta última parte de los resultados se pueden observar las micrografías obtenidas de los diferentes dopajes, esto utilizando un microscopio Field Emission Scanning Electron modelo JSM7800F con un voltaje de aceleración de 5 kV y aumentos de 5000.

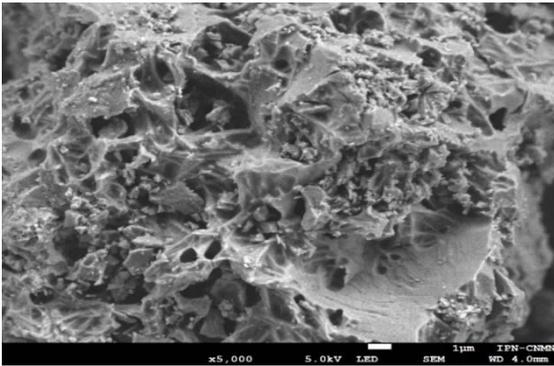


Figura 6: Caracterización MEB de polvos de  $\text{TiO}_2$ :  $\text{Eu}^{3+}$  a  $600^\circ\text{C}$

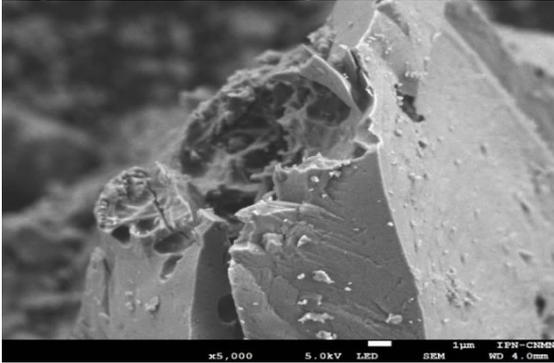


Figura 7: Caracterización MEB de polvos de  $\text{TiO}_2$ :  $\text{Ag}^+$  a  $600^\circ\text{C}$

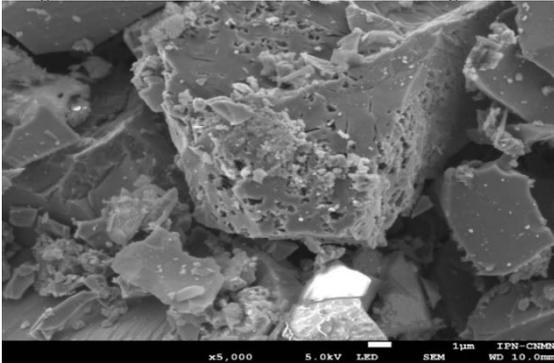


Figura 8: Caracterización MEB de polvos de  $\text{TiO}_2$ :  $\text{Mn}^{2+}$  a  $600^\circ\text{C}$

En las micrografías mostradas en las Figuras 8, 9 y 10 se pueden observar que las partículas se encuentran aglomeradas y de igual forma son amorfas, presentando una superficie accidentada, especialmente en la muestra de dopaje con el ion  $\text{Eu}^{3+}$ . Las variaciones presentadas respecto a rugosidad y tamaño de partícula, entre las tres muestras, se pueden atribuir a la fuente dopante utilizada. A pesar de que cada una de las diferentes imágenes pertenecen a dopajes con distintos iones de  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Ag}^+$  y  $\text{Mn}^{2+}$  todas ellas presentan algunas porosidades de un tamaño aproximado de 1 a 2 micrómetros en la superficie de la partícula, que deberán ser estudiadas más especialmente tanto en la verificación y efecto de estos poros, así como la comprobación de qué tipo de porosidad es la que se presenta.

#### 4. Conclusiones

Se obtuvieron polvos de  $\text{TiO}_2$  dopado con los iones  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Ag}^+$  y  $\text{Mn}^{2+}$ , por el método de sol-gel, los cuales fueron caracterizados y se observó que se logró obtener la estructura de la fase anatasa la cual en su interior contendrá a los iones dopantes, debido a que no se observa la distorsión de la red cristalina, además de que, de acuerdo con los difractogramas observados, el tratamiento térmico permite que esta evolucione y se defina a partir de la temperatura de  $500^\circ\text{C}$ , de igual forma los enlaces característicos del  $\text{TiO}_2$  y sus dopajes con los iones  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Ag}^+$  y  $\text{Mn}^{2+}$ , observados en las espectroscopias FT-IR muestran una respuesta favorable para la corroboración de la presencia del  $\text{TiO}_2$  dopado. Además de esto, las micrografías muestran la presencia de porosidades en las partículas del  $\text{TiO}_2$  dopado con los distintos iones. Finalmente se ha comenzado la deposición de las películas sobre los sustratos de sílice para analizar mejor sus propiedades absorbentes.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al Centro de Investigación e Innovación Tecnológica y del Centro de Nano Micro y Nanotecnología del Instituto Politécnico Nacional además del apoyo CONACyT del proyecto SIP-IPN 20196322. Adicionalmente de una colaboración con la Universidad Tecnológica de Tecámac.

#### Referencias

- Beeldens, A. (2006). An environmental friendly solution for air purification and self-cleaning effect: the application of  $\text{TiO}_2$  as photocatalyst in concrete. In *transport research arena europe 2006: goeteborg, sweden, june 12th-15th 2006*:
- Debijs, M. G., & Verbunt, P. P. C. (2012). Thirty years of luminescent solar concentrator research: Solar energy for the built environment. *Advanced Energy Materials*.
- Dienel, T., Bauer, C., Dolamic, I., & Dominik, D. B. (2010). Spectral-based analysis of thin film luminescent solar concentrators. *Solar Energy*, 84(8), 1366–1369.
- Jelle, B. P., Breivik, C., & Drolsum Røkenes, H. (2012). Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Elsevier.
- Krumer, Z., Sark, W. G. J. H. M. Van, Schropp, R. E. I., & Donegá, C. D. M. (2017). Compensation of self-absorption losses in luminescent solar concentrators by increasing luminophore concentration. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 167(April), 133–139.
- Vargas Hernández, J., Coste, S., García Murillo, A., Carrillo Romo, F., & Kassiba, A. (2017). Effects of metal doping (Cu, Ag, Eu) on the electronic and optical behavior of nanostructured  $\text{TiO}_2$ . *Journal of Alloys and Compounds*, 710, 355–363.