

Recibido 24 de abril 2021. Aceptado 18 de octubre 2021. Publicado 23 de diciembre 2021.

ISSN: 2448-7775

# Obtención de películas delgadas de TiO<sub>2</sub> por medio de Rocío Pirolítico Ultrasónico con aplicaciones fotovoltaicas

**Mariely Isabel Loeza Poot, Julet Marcela Méndez Hernández, Eric Noe Hernández Rodríguez\***

Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato

\*Autor de Correspondencia: noe.hernandez@ugto.mx

**RESUMEN** El TiO<sub>2</sub> es uno de los materiales que posee una amplia gama de aplicaciones desde su uso en papel, pinturas, alimentos y medicamentos, hasta la electrónica. En esta última rama, su implementación se basa principalmente en materiales en forma de película delgada, existiendo diversas técnicas para su obtención. Entre las cuales, se puede destacar el depósito por Rocío Pirolítico Ultrasónico, dado que tiene la ventaja de ser un proceso controlable, de bajo costo y mediante el cual se pueden obtener materiales con alta calidad. Por lo tanto, este trabajo se enfoca en la adecuación de la configuración del sistema de depósito con el fin de obtener películas delgadas de TiO<sub>2</sub> uniformes y con una alta repetibilidad, cuyas propiedades sean adecuadas para su implementación en la fabricación de celdas solares poliméricas.

**PALABRAS CLAVE**— Películas delgadas de TiO<sub>2</sub>, rocío pirolítico ultrasónico, uniformidad, celdas solares poliméricas.

## I. INTRODUCCIÓN

El dióxido de titanio es un compuesto inorgánico de color blanco, se encuentra en la naturaleza en fase sólida y está formado por la unión de un átomo de titanio y dos átomos de oxígeno, dando como resultado la fórmula química TiO<sub>2</sub>. Algunas de las propiedades que posee son estabilidad física y química, no toxicidad, abundancia, alto índice de refracción ( $n = 2.7$ ), absorción de la radiación ultravioleta, biocompatibilidad, etc. Permitiendo su implementación en una amplia gama de productos como el papel, pinturas, plásticos, protectores de corrosión, alimentos y medicamentos [1].

Por lo tanto, se han llevado a cabo numerosas investigaciones en torno a este material, a tal grado de que se ha logrado su incorporación en el desarrollo de dispositivos electrónicos como los sensores de gas, fotocatalizadores, materiales termocrómicos y celdas solares [2]. Siendo estas últimas un tema de interés a nivel mundial, debido a los esfuerzos que se han encaminado para mitigar los efectos medioambientales generados por el uso de combustibles fósiles, así como para cubrir la demanda energética [3, 4]. Entre los tipos de celdas solares que existen, destacan las celdas poliméricas, debido a que poseen ciertas ventajas, entre las que se pueden mencionar el bajo costo de producción, fácil fabricación y la posibilidad de ser flexibles. Estos dispositivos se encuentran integrados por materiales orgánicos y/o inorgánicos en

forma de película delgada, apilados sucesivamente. En ellos, el TiO<sub>2</sub> es comúnmente empleado como un material transportador de electrones, es decir, funciona como una especie de puente que permite el acople eléctrico-estructural entre la capa activa de la celda y uno de sus electrodos, mejorando de esta forma el flujo de electrones que se producen durante el efecto fotovoltaico y que puedan ser fácilmente colectados para dar lugar a la generación de energía eléctrica [5, 6].

Cabe señalar, que una película delgada es un material de bajas dimensiones cuyo espesor va desde algunos nanómetros ( $1\text{nm} = 1 \times 10^{-9}\text{ m}$ ) hasta unos cuantos micrómetros ( $1\mu\text{m} = 1 \times 10^{-6}\text{ m}$ ) [7]. Esta forma de materia exhibe propiedades únicas que son diferentes a las que posee el material en bulto, y para fabricarse se han desarrollado diversas técnicas de depósito que involucran procesos químicos, físicos o una combinación de ambos. Por lo que, las propiedades del material resultante están influenciadas por la técnica de depósito. En el caso del TiO<sub>2</sub>, este puede obtenerse por pulverización catódica (sputtering) [8], rocío pirolítico [9], ablación láser [10], sol-gel [11] y electrodeposición [12].

La existencia de diversas técnicas de depósito se ha debido en gran medida al desarrollo tecnológico de los últimos años. Sin embargo, uno de los retos a los que hay que enfrentarse al momento de escalar una tecnología (pasar de dispositivos pequeños de nivel laboratorio a dispositivos de tamaño comercial) es conservar la uniformidad y las

propiedades del material en áreas grandes. Por lo tanto, en el caso de las celdas solares, el conocimiento y dominio de las técnicas de depósito juega un papel muy importante en la obtención de dispositivos competitivos a nivel comercial, evitando efectos negativos que limiten su desempeño.

Basados en lo anterior, en este trabajo se realiza la adecuación de un sistema de depósito de películas delgadas de TiO<sub>2</sub> mediante la técnica de Rocío Pirolítico Ultrasónico (RPU), analizando los efectos que producen la configuración del sistema de depósito en las propiedades del material, específicamente a través de la medición de los espectros de transmitancia óptica. Esta técnica de caracterización es uno de los métodos más utilizados para el estudio de las propiedades ópticas de materiales en forma de película delgada, puesto que nos da información acerca de la fracción o porcentaje de luz incidente que atraviesa la muestra a una cierta longitud de onda. Así mismo, utilizando dichos espectros es posible el cálculo indirecto del espesor de las películas. Cabe señalar, que en el caso de las celdas solares, la optimización de la cantidad de luz que llega a la capa activa es un factor de suma importancia que se encuentra estrechamente relacionado con el desempeño del dispositivo. Por lo tanto, el análisis óptico realizado en este trabajo tiene el objetivo de obtener películas delgadas de TiO<sub>2</sub> con alta uniformidad y reproducibilidad, que permitan su aplicación en la fabricación de celdas solares poliméricas y su posterior escalamiento.

## II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta sección se describen los materiales y métodos empleados para el depósito y caracterización de las películas delgadas de TiO<sub>2</sub> depositadas mediante la técnica de RPU, con el fin de obtener un material uniforme y reproducible. Para lograr los objetivos planteados, el trabajo se llevó a cabo mediante la siguiente secuencia:

1. Análisis de la técnica de RPU y determinación de los parámetros a variar.
2. Evaluación de los parámetros y selección de las mejores condiciones de depósito.
3. Optimización del proceso de depósito para la obtención de películas delgadas de TiO<sub>2</sub> aplicables en celdas solares poliméricas.

### A. PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE LA TÉCNICA DE DEPÓSITO

El Rocío Pirolítico Ultrasónico (RPU) es una técnica química de depósito que consiste en la vaporización de una solución precursora por medio de un nebulizador ultrasónico, la niebla producida es transportada (mediante el arrastre de algún gas) a través de un canal de conducción hacia el sustrato. Este último, se encuentra previamente

calentado para que, al interactuar con las partículas vaporizadas ocurra una reacción pirolítica que dará lugar a la formación de la película delgada [13]. Por lo tanto, un sistema de depósito por RPU se encuentra formado por un sistema de nebulización ultrasónica, la solución precursora del material a depositar, un sistema de transporte (conformado por el canal de conducción y el gas de arrastre), el sustrato que se desea recubrir, un sistema de calentamiento y una cámara de aislamiento dentro de la cual se lleve a cabo el depósito, limitando la interacción con el medio circundante y extrayendo los gases generados durante el proceso.

### B. MATERIALES Y EQUIPO

A continuación, se describen los materiales y el equipo utilizado para el depósito de las películas delgadas de TiO<sub>2</sub>, así como los procesos que se llevaron a cabo para su preparación. Un esquema representativo de dicho sistema es presentado en la Fig. 1.

- Los depósitos se realizaron sobre sustratos de vidrio Corning de 1 × 1 in<sup>2</sup>, previamente lavados en un equipo de baño ultrasónico, mediante inmersiones sucesivas por 6 min en las siguientes soluciones: agua jabonosa, acetona, metanol y etanol. Al término de cada etapa, los vidrios fueron enjuagados con agua destilada y secados.
- La solución precursora está conformada por el reactivo acetilacetato de titanio (IV) (TiO (acac)<sub>2</sub>) de la marca Aldrich Chemistry disuelto en metanol.
- El proceso de nebulización ultrasónica se llevó a cabo con un equipo comercial WH802 YUEHUA [14], el cual genera partículas con diámetros entre 1 y 5 μm.
- El sistema de transporte está conformado por una tubería corrugada de nebulización, usando aire extra seco de la marca INFRA [15] como gas de arrastre, con una razón de flujo de 2 l/min.
- Para calentar el sustrato se hizo pasar corriente a una placa de grafito, con ayuda de una fuente TDK-Lambda GEN8-300.
- Una cubierta de acrílico fungió como cámara aislante dentro de la cual se realiza el depósito y que cuenta con un sistema de extracción de gases.

### C. CARACTERIZACIÓN

La uniformidad y las propiedades ópticas de las películas delgadas de TiO<sub>2</sub> fueron evaluadas en primera instancia visualmente, llevando a cabo una documentación fotográfica de las muestras obtenidas. Por otra parte, también se realizaron mediciones de espectroscopía UV-vis para obtener las curvas de transmitancia óptica, esto usando un espectrofotómetro UV-VIS-NIR de la marca Ocean Optics modelo US 4000-XR1-ES [16, 17].

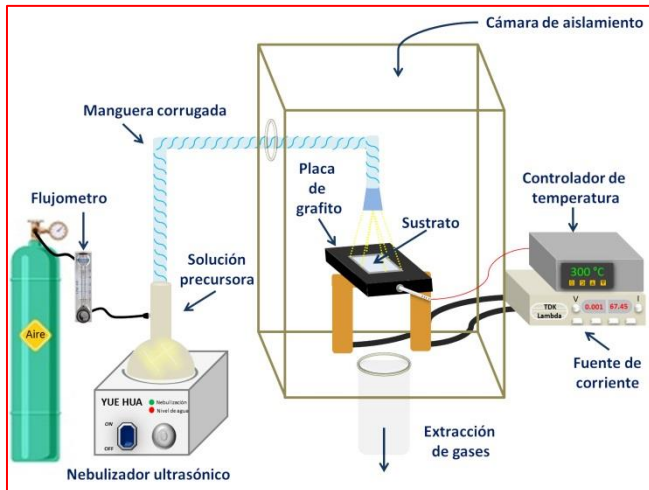


Fig. 1. Esquema representativo del sistema de depósito por RPU utilizado y las partes que lo conforman.

### III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en este trabajo, usando la secuencia presentada en la sección anterior.

#### A. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS A EVALUAR

Con base en las secciones anteriores, se puede notar que la implementación de la técnica de RPU no requiere de equipos sofisticados, permitiendo realizar el depósito de diferentes materiales y recubriendo sustratos con diferentes rugosidades y geometrías. Lo que la convierte en una técnica versátil y de bajo costo, con un gran potencial para escalar los procesos e incorporarlos en una producción en serie. Sin embargo, dada la flexibilidad que presenta, es necesario tener el dominio y conocimiento de los efectos que puedan generar cada uno de los elementos que la integran. Por lo tanto, a continuación, se analizan algunos de los componentes que se consideran más sobresalientes, haciendo una breve descripción de sus aportaciones.

##### 1. Solución precursora y temperatura del sustrato

La solución precursora está formada por sales de los elementos a depositar, disueltas en algún tipo de alcohol o incluso agua. Por lo que, para la obtención de películas delgadas con alta calidad y adherencia, se debe de tener en cuenta la concentración de la solución, el tamaño de las gotas generadas y la temperatura del sustrato. De tal manera que esta última asegure la completa evaporación del solvente y propicie un material con propiedades adecuadas.

##### 2. Sistema de transporte

Este sistema está integrado por el canal de conducción y el gas de arrastre. El primero, debe estar fabricado de

materiales químicamente estables y resistentes a altas temperaturas, evitando de esta forma reaccionar con el material atomizado y soportar el calor que se produce al calentar el sustrato. Uno de los componentes más importantes en el canal de conducción es la boquilla, ubicada al final de dicho canal, y de cuya forma y tamaño depende el frente de aspersión que viaja hacia el sustrato. Por lo que, se debe de tener un equilibrio entre el diámetro y la cantidad de material atomizado, puesto que diámetros pequeños cubrirán áreas muy focalizadas del sustrato, mientras que usando diámetros de mayor tamaño se corre el riesgo de no generar un volumen de atomización suficiente para llenar la boquilla y que el frente generado no sea uniforme [18]. Así mismo, se debe de adecuar el flujo másico del gas de arrastre, de tal forma que sea lo suficiente para poder desalojar las especies atomizadas, pero no tan rápido para generar turbulencias.

##### 3. Tiempo de depósito

Este parámetro se encuentra estrechamente relacionado con la cantidad del material depositado sobre el sustrato. Así mismo, la distancia boquilla-sustrato también influye en el espesor de la capa, por lo tanto, una vez establecido el diseño del equipo y los parámetros a usar, se puede optimizar el tiempo del recubrimiento, dependiendo de las necesidades requeridas en cada aplicación.

Analizando cada uno de estos elementos y comparándolos con los detalles experimentales antes expuestos y los reportados en la literatura, se puede concluir lo siguiente:

- El tamaño de las gotas no es un parámetro ajustable, puesto que depende del sistema de nebulización.
- El uso del reactivo de TiO (acac)<sub>2</sub> para la formación de la solución precursora ha sido exitosamente probado por distintos autores, quienes han obtenido películas de TiO<sub>2</sub> de alta calidad [19, 20].
- El rango de temperatura del sustrato reportado en la literatura para el depósito del TiO<sub>2</sub> varía entre 200 y 500 °C [21, 22]. Sin embargo, en este grupo de trabajo se ha llevado a cabo una optimización de este parámetro [23], resultando ser 300 °C la temperatura más adecuada.
- La configuración del sistema de transporte es un parámetro determinante para obtener un depósito uniforme. En este caso, se usa como canal de transporte mangueras corrugadas de polipropileno que no reaccionan con el reactivo o el solvente, y al final se usa una boquilla cilíndrica de vidrio que resiste las altas temperaturas.
- Para aplicaciones fotovoltaicas, se ha reportado que el valor óptimo del espesor es de 50 nm [24], sin embargo, el ajuste del tiempo de depósito para controlar el espesor depende de los otros parámetros y la configuración del sistema.

Por lo tanto, uno de los elementos que se encuentra estrechamente relacionados con la uniformidad es sin duda el diseño de la boquilla, por lo tanto, se decidió evaluar los efectos de su geometría en la calidad de las películas obtenidas, así como la distancia de esta hacia el sustrato. En la **Tabla I** se describen los parámetros utilizados en el depósito de las películas delgadas de TiO<sub>2</sub>.

### B. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS

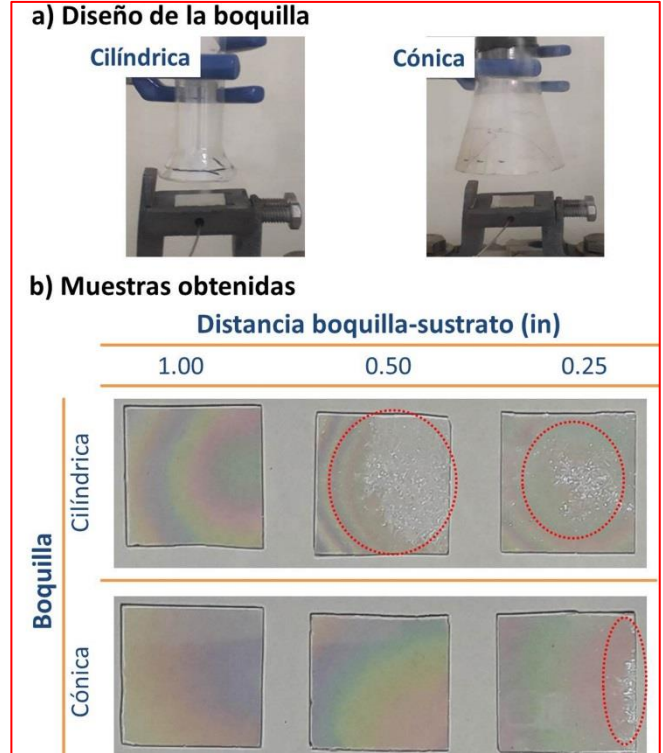
En la **Fig. 2** se muestran el diseño cilíndrico y el cónico para la boquilla, así como las películas de TiO<sub>2</sub> obtenidas en la evaluación de los parámetros previamente establecidos. Para los depósitos con la boquilla cilíndrica, independientemente de la distancia al sustrato, todas las muestras presentan patrones de círculos concéntricos, dándoles un aspecto multicolor, que podría interpretarse como un gradiente de espesores a lo largo del área del sustrato, siendo más grueso en el centro. Mientras que, en el caso de la boquilla cónica se obtuvieron películas con mayor uniformidad, puesto que los cambios en la tonalidad de las películas no son tan marcados, y aunque se continúa manteniendo el patrón circular, el grosor de las franjas es más ancho. Este cambio en el aspecto visual puede ser atribuido al incremento del área final de la boquilla, por lo que al ser más grande en el diseño cónico, las especies atomizadas se pueden extender generando un frente de atomización mayor.

La formación de discos en las películas es debida a la cinética del proceso, dado que las gotas al impactar con la superficie del sustrato se esparcen en una estructura en forma de disco, por lo que la película se compone de discos superpuestos de sal metálica que se convierten en óxidos sobre el sustrato calentado [25].

Las regiones punteadas en rojo (**Fig. 2**), señalan zonas de las películas donde se presentó el efecto de delaminación, coincidiendo en ambos diseños para distancias de la boquilla-sustrato a 0.25 in y siendo más notorio en el caso del diseño cilíndrico. Este comportamiento indica una disminución en la adherencia, lo cual se puede relacionar con el hecho de que al ser menor el recorrido libre que tienen las especies atomizadas, estas llegan en mayor cantidad, produciendo películas más gruesas que por efecto de estrés se rompen [26]. O bien, el acercamiento entre la boquilla y el sustrato caliente propicia una evaporación más rápida del solvente lo que genera una mala adherencia de las partículas restantes [25].

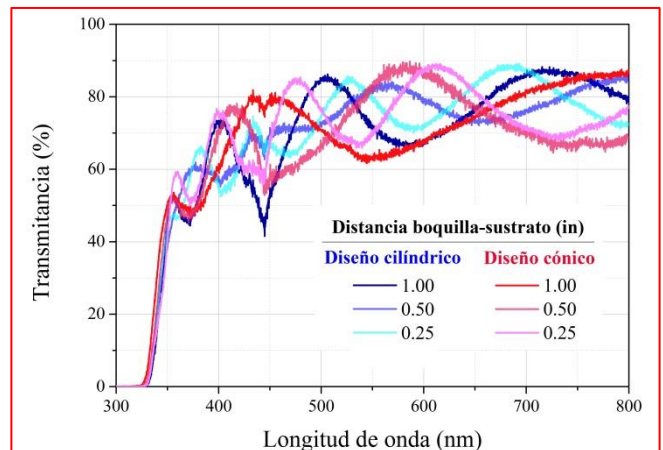
**TABLA I.** PARÁMETROS EXPERIMENTALES ESTABLECIDOS

Parámetro	Valores
Solución precursora	TiO (aac) <sub>2</sub> en metanol al 0.025 M
Forma de la boquilla	Cilíndrica y cónica
Distancia boquilla-sustrato	1.00, 0.50 y 0.25 in
Flujo másico del aire	2 l/min
Tiempo de depósito	15 min



**Fig. 2.** Imágenes fotográficas de a) las boquillas utilizadas, y b) las películas de TiO<sub>2</sub> obtenidas al variar la distancia boquilla-sustrato en cada caso.

En la **Fig. 3** se muestran los espectros de transmitancia óptica de las películas de TiO<sub>2</sub> obtenidas, las mediciones se realizaron en un rango de longitud de onda ( $\lambda$ ) de 300 a 800 nm. Para  $\lambda$  mayor que 400 nm, todas las películas exhiben una transmitancia mayor al 60 %, con oscilaciones que presentan máximos cercanos al 90 %. Dichas oscilaciones son debidas a la interferencia por reflexión que se presenta en la interface entre la película y el sustrato, disminuyendo su presencia con el incremento de la distancia boquilla-sustrato. Esto, debido a que dicha interferencia se encuentra directamente relacionada con el aumento del espesor, concordando de esta forma con las causas de la delaminación observada en la **Fig. 2**, la cual fue atribuida al aumento del estrés causado por el engrosamiento de la película.



**Fig. 3.** Espectros de transmitancia óptica de las películas de TiO<sub>2</sub> obtenidas al variar el diseño de la boquilla y la distancia de esta al sustrato.

Con base en los resultados anteriores, se puede concluir que la película más uniforme fue obtenida usando una boquilla cónica localizada a una distancia del sustrato de 1.00 in, por lo tanto, esas condiciones serán aquellas que se utilizarán para el depósito de las películas delgadas de TiO<sub>2</sub> con posible aplicación en celdas solares poliméricas.

### C. ADECUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE DEPÓSITO PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS

Una vez seleccionados los parámetros a usar en el depósito de las películas de TiO<sub>2</sub> por medio de la técnica de RPU, se llevó a cabo un proceso para ajustar el espesor de las películas, con el fin de ser aplicadas como capa transportadora de electrones en las celdas solares poliméricas. Por lo tanto, se depositaron 4 películas de TiO<sub>2</sub>, usando tiempos de 15, 30, 38 y 44 min, las imágenes fotográficas de las muestras resultantes son presentadas en la Fig. 4, donde se puede observar que el incremento en tiempo de depósito provoca un oscurecimiento de la película indicando un incremento del espesor. Así mismo, se puede resaltar la uniformidad de las películas obtenidas.

El espesor de las películas fue estimado por una técnica indirecta, usando los espectros de transmitancia óptica y aplicando el método propuesto por Swanepoel [27, 28]. Dicho método permite conocer las propiedades ópticas de una película delgada con un espesor  $d$ , índice de refracción  $n$  y coeficiente de extinción  $k$ , depositadas sobre un sustrato transparente finito. Donde se considera que el sustrato tiene un espesor mucho mayor que  $d$ , un índice de refracción  $s$  y un coeficiente de absorción  $\alpha = 0$ . El método basa su ajuste en las franjas de interferencia que se producen en los espectros de transmitancia, dichas franjas poseen máximos ( $T_M$ ) y mínimos ( $T_m$ ) de transmitancia que permiten generar envolventes del espectro, el cual se puede dividir en tres regiones dependiendo de la absorción presentada (Fig. 5). En la región de absorción media se puede calcular el valor del índice de refracción para una determinada  $\lambda$ , por medio de la Ec. (1) y Ec. (2).

$$n = [M + (M^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (1)$$

$$M = 2s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{s^2 + 1}{2} \quad (2)$$

Por lo tanto, si conocemos  $n(\lambda)$ , entonces el espesor de la película estará dado por la Ec. (3), donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de dos máximos (o mínimos) adyacentes, ubicados en  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , respectivamente.

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad (3)$$

En la Fig. 6a) se muestran los espectros de transmitancia de las películas delgadas de TiO<sub>2</sub> obtenidos al variar el tiempo de depósito. Se puede observar una disminución del porcentaje de transmitancia y la presencia de una mayor

cantidad de franjas de interferencia al incrementar el tiempo de depósito. Este comportamiento se encuentra relacionado con el incremento del espesor de la película, tal como ha sido reportado por otros autores [29]. Los cálculos del espesor fueron realizados para los tiempos de depósito de 30, 38 y 44 min, puesto que son los que presentan mayor interferencia. Los valores obtenidos son presentados en la Fig. 6b), junto con el ajuste lineal que describe el comportamiento del espesor con respecto al tiempo de depósito.

Haciendo uso de la ecuación que describe el comportamiento del espesor, se estimó que el tiempo necesario para obtener una película de 50 nm es de 12.8 min. Bajo estas condiciones y usando sustratos de vidrio y óxido de indio dopado con estaño (ITO, por sus siglas en inglés) se procedió a realizar el depósito del TiO<sub>2</sub>. El hecho de que se haya escogido al ITO como sustrato, es que este material es comúnmente utilizado como cátodo en las celdas solares. Por lo tanto, en la Fig. 7 se muestran los espectros de transmitancia óptica de los sustratos utilizados, así como de las películas de TiO<sub>2</sub> depositadas sobre ellos. Demostrándose de esta forma que la película de TiO<sub>2</sub> depositada bajo las condiciones de optimización obtenidas en este trabajo, mantiene su comportamiento óptico tanto en los depósitos sobre vidrio e ITO, comprobando de esta forma la repetibilidad del proceso.

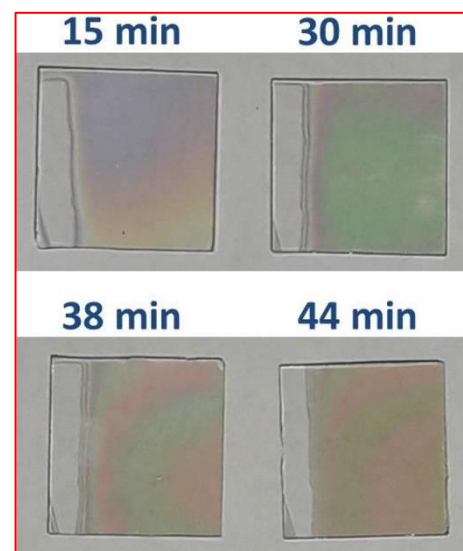


Fig. 4. Películas de TiO<sub>2</sub> obtenidas al variar el tiempo de depósito, usando una boquilla cónica ubicada a una distancia del sustrato de 1.0 in.

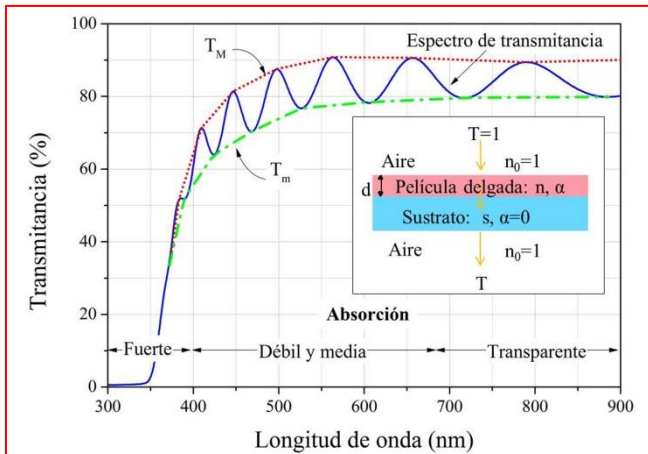


Fig. 5. Consideraciones del espectro de transmitancia tomadas como referencia en el método de Swanepoel.

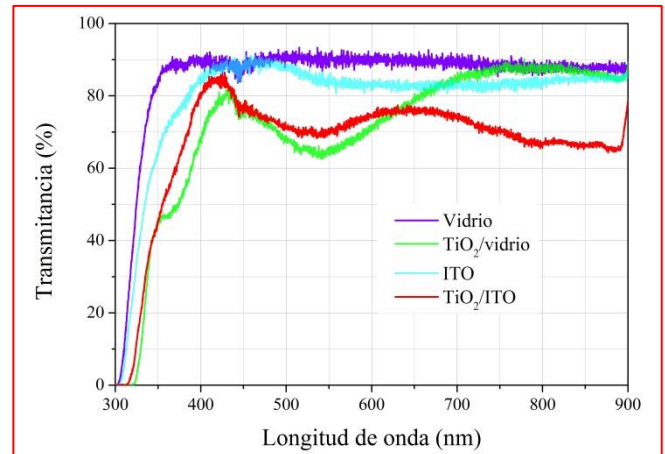


Fig. 7. Espectro de transmitancia de las películas de TiO<sub>2</sub> depositadas bajo las condiciones de optimización usando sustratos de vidrio e ITO.

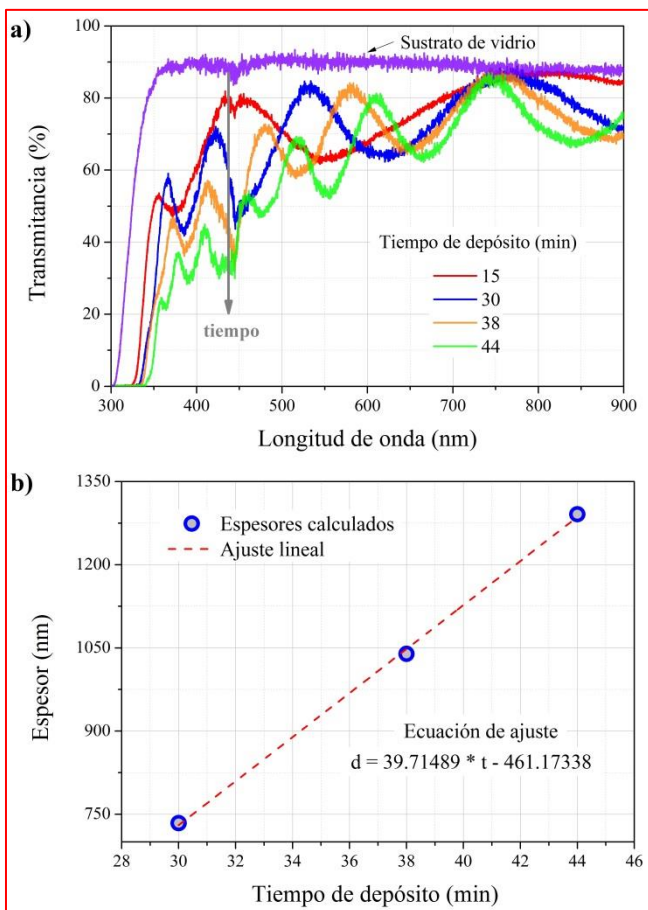


Fig. 6. a) Espectros de transmitancia óptica del TiO<sub>2</sub> variando el tiempo de depósito, y b) ajuste lineal de los espesores calculados.

## CONCLUSIONES

Se logró la adecuación de un sistema de depósito por la técnica de Rocío Pirolítico Ultrasónico (RPU) para la obtención de películas delgadas de TiO<sub>2</sub>. Logrando una uniformidad en las capas al usar un diseño de boquilla cónica, localizado a una distancia del sustrato de 1.00 in. Así mismo, se encontró una ecuación de correlación entre el tiempo de depósito y el espesor de las películas de TiO<sub>2</sub>. De esta manera se logró un ajuste del espesor de las películas a 50 nm, utilizando un método óptico indirecto. Permitiendo bajo las condiciones de optimización obtener películas uniformes y procesos repetibles de depósito, que puedan ser utilizados en la fabricación del TiO<sub>2</sub> para su aplicación en celdas solares.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado a través del proyecto PDCPN 2015-28 y a la Universidad de Guanajuato por el financiamiento otorgado a través de la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2021. Mariely Isabel Loeza Poot agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca (CVU: 556332) otorgada para la realización de una estancia posdoctoral en la DICIS de la Universidad de Guanajuato.

## REFERENCIAS

- [1] X. Chen and S.S. Mao, "Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications," *Chemical Reviews*, vol. 107, no. 7, pp. 2892-2959, 2007.
- [2] R. Taziwa and E. Meyer, "Fabrication of TiO<sub>2</sub> nanoparticles and thin films by ultrasonic spray pyrolysis: Design and optimization" in *Pyrolysis*, first edition, IntechOpen, 2018. Chapter 9, pp. 2. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5772/67866>
- [3] L.H. Berrío, C. Zuluaga, "Smart Grid y la energía solar fotovoltaica para la generación distribuida: una versión en el contexto energético mundial," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 32, no. 2, pp. 369-396, julio-diciembre 2014.
- [4] L.M. Rendón López, "Un llamado para apostar por energías renovables", *Revista Producción+Limpia*, vol. 13, no. 1, pp.1, 2018.
- [5] Kun-Mu Lee, Wei-Jhih Lin, Shih-Hsuan Chen, and Ming-Chung Wu, "Control of TiO<sub>2</sub> electron transport layer properties to enhance

- perovskite photovoltaics performance and stability,” *Organic Electronics*, vol. 77, pp. 105406, 2020.
- [6] O. Yoshikawa, A. Hayakawa, T. Fujieda, K. Uehara, and S. Yoshikawa, “Enhanced efficiency and stability in P3HT:PCBM bulk heterojunction solar cell by using TiO<sub>2</sub> hole blocking layer,” *Material Research society symposium proceeding*, Vol. 965, 2007.
- [7] C. Guozhong and Y. Wang, “Two-Dimensional nanostructures: thin films” in *Nanostructures and nanomaterials: Synthesis, properties and applications*, second edition, Imperial College Press, 2004. Chapter 5, pp. 174.
- [8] E. Hernández-Rodríguez, M. Zapata-Torres, “Obtención de películas delgadas de sub-óxidos de titanio (TiO<sub>x</sub>, con 0<x<2)” en *VI Simposio de Tecnología Avanzada*, CICATA-IPN, México D.F., 25-30 de noviembre de 2010.
- [9] S. Dhanapandian, A. Arunachalam, C. Manoharan, “Effect of deposition parameters on the properties of TiO<sub>2</sub> thin films prepared by spray pyrolysis,” *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 77, pp. 119-135, 2016.
- [10] S. Murugesan, P. Kuppasami, N. Parvathavarthini, E. Mohandas, “Pulsed laser deposition of anatase and rutile TiO<sub>2</sub> Thin films,” *Surface & Coatings Technology*, vol. 201, pp. 7713-7719, 2007.
- [11] M.A. Santana-Aranda, M. Morán-Pineda, J. Hernández, S. Castillo, R. Gómez, “Physical properties of TiO<sub>2</sub> prepared by sol-gel under different pH conditions for photocatalysis,” *Superficies y Vacío*, vol. 18, no. 1, pp. 46-49, 2005.
- [12] A. Castillo-Ballesteros, M. Zapata-Torres, A. Zapata-Navarro, J.L. Fernández Muñoz, J. Guillén-Rodríguez, E. Valaguez-Velazquez, M. Melendez-Lira, “Crecimiento de películas de TiO<sub>2</sub> por electrodeposición pulsada: Influencia de la frecuencia de los pulsos de voltaje,” *Superficies y Vacío*, vol. 28, no. 4, pp. 119-123, 2015.
- [13] C. Falcony, M.A. Aguilar-Frutis and G. Hipólito, “Spray pyrolysis technique; High-k dielectric films and luminescent materials: A review,” *Micromachines*, vol. 9, pp. 414, 2018.
- [14] Gaungdong Yuehua Medical Instrument Factory Co., Ltd. “Detailed product description: YHMED medical product (Ultrasonic nebulazer),” [online]. Available: [http://www.medicn.com/sell\\_offers/117600/medical-productUltrasonic-Nebulizer.html](http://www.medicn.com/sell_offers/117600/medical-productUltrasonic-Nebulizer.html)
- [15] Grupo INFRA, “Hoja de Datos de Seguridad: HDS Aire (Gas comprimido),” Junio 2016, [en línea]. Disponible: [https://grupoinfra.com/librerias/descargas/HDS%2009%2001%20AI RE%20\(GAS%20COMPRIMIDO\)%20REV.%205.pdf](https://grupoinfra.com/librerias/descargas/HDS%2009%2001%20AI RE%20(GAS%20COMPRIMIDO)%20REV.%205.pdf)
- [16] Ocean Optics, “USB4000 Fiber Optic Spectrometer: Installation and Operational Manual,” 2008 [online]. Available: <https://www.oceaninsight.com/globalassets/catalog-blocks-and-images/manuals--instruction-old-logo/spectrometer/usb4000operatinginstructions.pdf>
- [17] Ocean Insight, “DH-2000-Ball Light Source,” [Online]. Available: <https://www.oceaninsight.com/products/light-sources/uv-vis-nir-light-sources/dh-2000-bal/?qty=1>
- [18] L. Monroy Jaramillo, “Producción y caracterización de recubrimientos del sistema Y-Ba-Cu-O producidos por medio de la técnica de rocío pirolítico,” Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, 2009.
- [19] L. Castañeda, A. López-Suárez and A. Tiburcio-Silver, “Influence of colloidal silver nanoparticles on the novel flower-like titanium dioxide oxygen sensor performances,” *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 10, no. 2, pp. 1343-1348, 2010.
- [20] M. Okuya, K. Nakade, and S. Kaneko, “Porous TiO<sub>2</sub> thin films synthesized by a spray pyrolysis deposition (SPD) technique and their application to dye-sensitized solar cells,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 70, pp. 425-435, 2002.
- [21] Masayuki Okuya, Koji Nakade, Shoji Kaneko, “Porous TiO<sub>2</sub> thin films synthesized by spray pyrolysis deposition (SPD) technique and their application to dye-sensitized cells,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 70, pp. 425-435, 2002.
- [22] Z. Chen, I. Dündar, I. Oja Acik, and A. Mere, “TiO<sub>2</sub> thin films by ultrasonic spray pyrolysis,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 503, pp. 012006, 2019.
- [23] H. Mejía, “Desarrollo de recubrimientos de TiO<sub>2</sub> para protección de piezas de bronce inmersas en solución salina,” Tesis de Maestría, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, División de Ingenierías, Salamanca, Gto., 2019.
- [24] M. Abdallaoui, N. Sengouga, A. Chala, A.F. Meftah y A.M. Meftah, “Comparative study of conventional and inverted P3HT:PCBM organic solar cell,” *Optical Materials*, vol. 105, pp. 109916, 2020.
- [25] D. Perednis and L.J. Gauckler, “Thin film deposition using spray pyrolysis,” *Journal of Electroceramics*, vol. 14, pp. 103-111, 2005.
- [26] G. Abadias, E. Chason, J. Keckes, M. Sebastiani, G.B. Thompson, E. Barthel, G.L. Doll, C.E. Murray, C.H. Stoessel, L. Martinu, “Review article: stress in thin films and coatings: current status, challenges, and prospects,” *Journal of Vacuum Science and Technology A*, vol.36, no. 2, pp.020801 1-02080 48, 2018.
- [27] R. Swanepoel, “Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 16, pp. 1214-1222, 1983.
- [28] I. Tirca, I. Boerasu, M.S. Radu, and M. Osiaç, “Refractive index of WO<sub>3</sub> thin films grown under various temperatures determined by the Swanepoel method,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 620, pp. 413266, 2021.
- [29] H. Ennaceri, M. Boujnah, A. Taleb, A. Khaldoun, R. Sáez-Araoz, A. Ennaoui, A. El Kenz, and A. Benyoussef, “Thickness effect on the optical properties of TiO<sub>2</sub>-anatase thin films prepared by ultrasonic spray pyrolysis: Experimental and ab initio study,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 30, pp. 19467-19480, 2017.

## BIOGRAFÍAS

**MARIELY ISABEL LOEZA POOT** es egresada del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, donde obtuvo el grado de Doctora en Ciencias en la Especialidad de Física Aplicada en 2020. A lo largo de su formación se ha dedicado a la síntesis, impurificación y desarrollo de materiales semiconductores en forma de película delgada y su aplicación en la fabricación de prototipos de celdas solares fotovoltaicas. Actualmente realiza una estancia posdoctoral CONACYT en la DICIS de la Universidad de Guanajuato con un enfoque en la fabricación de celdas solares poliméricas.

**JULET MARCELA MÉNDEZ HERNÁNDEZ** recibió el grado de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, Colombia, en 2014, y el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Guanajuato, México, en 2018. Desde el 2019 es estudiante de doctorado en la Universidad de Guanajuato, dedicando su tesis al desarrollo de un modelo numérico-experimental para las interacciones entre las capas (películas delgadas) que componen una celda solar fotovoltaica orgánica.

**ERIC NOÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ** es profesor asociado C adscrito al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Guanajuato. En el 2012 obtuvo el grado de Doctor en Tecnología Avanzada por el Instituto Politécnico Nacional, y de 2013 a 2015 realizó una estancia posdoctoral en el Departamento de Física Aplicada del CINVESTAV-IPN. Actualmente realiza investigación en el área de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, con un enfoque hacia el desarrollo de nuevos materiales para su aplicación en celdas solares fotovoltaicas y la modificación superficial de materiales metálicos. Ha impartido clases a nivel licenciatura y posgrado, y dirigido tesis de licenciatura, maestría y doctorado.