



## Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx)

### Síntesis de películas de ZnO:Li utilizando un reactor hidrotérmico basado en Arduino: Una aplicación para celdas solares

### Synthesis of ZnO:Li films using an Arduino-based Hydrothermal reactor: An application to solar cells

Hernández-Ortiz, M.<sup>a</sup>, Sifuentes-Gallardo, C.<sup>a</sup>, Moreno-Chávez, G.<sup>a</sup>, Badillo-Almaraz, H.<sup>a</sup>, Cruz-Domínguez, O.<sup>b</sup>, Domínguez-Domínguez, J.<sup>b</sup>, Guirette-Barbosa, O.<sup>b</sup>, Carrera-Escobedo, J.<sup>b</sup>, Guzmán-Valdivia, C.<sup>c</sup>, Cleva, M.<sup>d</sup>, De la Rosa-Vargas, I.<sup>a</sup>, Durán-Muñoz, H.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma de Zacatecas, Jardín Juárez 147, Centro, 98000, México.

<sup>b</sup> Universidad Politécnica de Zacatecas, Plan de Pardillo, 99059 Fresnillo, México.

<sup>c</sup> Universidad Autónoma de Aguascalientes, Departamento de Mecánica, México.

<sup>d</sup> Universidad Tecnológica Nacional de Argentina, Facultad Regional Resistencia, Chaco, Argentina.

[marlen.hernandez@uaz.edu.mx](mailto:marlen.hernandez@uaz.edu.mx); [clausifuen@uaz.edu.mx](mailto:clausifuen@uaz.edu.mx); [gamalielmch@uaz.edu.mx](mailto:gamalielmch@uaz.edu.mx); [hbadillo.civil@uaz.edu.mx](mailto:hbadillo.civil@uaz.edu.mx);

[ocruz@upz.edu.mx](mailto:ocruz@upz.edu.mx); [jdominguez@upz.edu.mx](mailto:jdominguez@upz.edu.mx); [omarguirette@hotmail.com](mailto:omarguirette@hotmail.com); [jcarrera@upz.edu.mx](mailto:jcarrera@upz.edu.mx);

[cesar.guzman.valdivia@gmail.com](mailto:cesar.guzman.valdivia@gmail.com); [clevamario@hotmail.com](mailto:clevamario@hotmail.com); [ismaelrv@ieee.org](mailto:ismaelrv@ieee.org); [hectorduranm@hotmail.com](mailto:hectorduranm@hotmail.com)

**Innovación tecnológica:** Desarrollo de un reactor hidrotérmico basado en Arduino, con un sistema de automatización para agitación, control de temperatura, presión y de bajo costo.

**Área de aplicación industrial:** Generación de celdas solares de bajo costo.

Recibido: 15 septiembre 2021

Aceptado: 16 abril 2022

### Abstract

Solar energy becomes more important in society, due to the low level of pollution it produces compared to fossil fuels. One way to take advantage of solar energy is using solar cells, which are made with zinc oxide films. To have its synthesis it is necessary to use a hydrothermal reactor, which has become increasingly expensive. Making it unavailable to most educational institutions and the private sector. To solve the problem of its high cost, the aim of this work was to manufacture a hydrothermal reactor based on Arduino, with an automation system with agitation, temperature-pressure control and low cost. This through a simple and practical methodology, which is focuses on users without deep knowledge in electronics and programming. SolidWorks® software was used for physical design and stress validation in the hydrothermal reactor. The cost of the reactor proposed in this work is 6 times lower than the cost of a commercial reactor. To validate the reliability of the reactor, three lithium-doped zinc oxide films with different molarities

were synthesized. These films presented a transmittance response equivalent to that reported in the literature. Finally, it is intended that the relevance of this work is to encourage users, through the proposed methodology, to manufacture not only a hydrothermal reactor, but also to manufacture complex laboratory equipment.

**Keywords:** zinc oxide films, Arduino, hydrothermal reactor.

## Resumen

La energía solar cobra mayor importancia en la sociedad, debido al bajo nivel de contaminación que produce en comparación con los combustibles fósiles. Una forma de aprovechar la energía solar es mediante el uso de celdas solares, que se fabrican con películas de óxido de zinc. Para su síntesis, es necesario utilizar un reactor hidrotermal, que se ha vuelto cada vez más costoso. Haciéndolo inaccesible para la mayoría de las instituciones educativas y el sector privado. Para solucionar el problema de su alto costo, el objetivo de este trabajo fue fabricar un reactor hidrotermal basado en Arduino, con un sistema de automatización con agitación, control de temperatura-presión y de bajo costo. Esto a través de una metodología sencilla y práctica, que está enfocada a usuarios sin conocimientos profundos en electrónica y programación. Se utilizó el software SolidWorks® para el diseño físico y la validación de esfuerzos en el reactor hidrotermal. El costo del reactor propuesto en este trabajo es 6 veces menor que el costo de un reactor comercial. Para validar la confiabilidad del reactor, se sintetizaron tres películas de óxido de zinc dopadas con litio con diferentes molaridades. Estas películas presentaron una respuesta de transmitancia equivalente a la reportada en la literatura. Finalmente, se pretende que la relevancia de este trabajo sea incentivar a usuarios, a través de la metodología propuesta, a fabricar no solo un reactor hidrotermal, sino también en fabricar complejos equipos de laboratorio.

**Palabras clave:** Películas de óxido de zinc, Arduino, reactor hidrotermal.

## 1 Introducción

Entre las principales fuentes de energía en el mundo se encuentran los combustibles fósiles, siendo de los agentes que contribuyen en gran medida a la problemática mundial de la contaminación del medio ambiente [1]. Para resolver tal problemática, es necesario buscar fuentes de energía alternas y que sean amigables con el medio ambiente. Entre estas fuentes se encuentra la energía solar, la cual es reconocida como una fuente prometedora de energía sustentable [2], y que puede ser aprovechada por medio del uso de celdas solares [3].

La mayoría de las celdas solares utilizan películas de óxido de zinc (ZnO), y normalmente son dopadas con cobre, indio y selenio para mejorar su eficiencia [4]. Además, la síntesis de películas de ZnO ha adquirido relevancia debido a sus propiedades de filtrado de radiación ultravioleta [5]. La síntesis de dichas películas puede realizarse mediante la técnica hidrotermal, por ser de bajo costo y sencilla de realizar en comparación con otras técnicas de síntesis. Esta técnica consiste en la reacción de precursores en presencia de un solvente, y se realiza en un reactor hidrotermal a temperatura superior a la del

punto de ebullición del solvente. Además, dicha técnica de síntesis puede realizarse a una temperatura moderada, permitiendo obtener polvos cerámicos. Los precursores utilizados pueden estar en soluciones, geles o suspensiones. Durante el proceso hidrotermal, la presión y la temperatura juegan un papel importante, debido a los procesos químicos que ocurren en la solución y las propiedades del solvente y su interacción con los precursores [6]. Además, mediante esta técnica es posible sintetizar monocristales, partículas finas y tiene una alta capacidad de disolución [7].

Con respecto a la implementación de un reactor hidrotermal, en la literatura se encuentra reportado la fabricación de varios tipos de reactores hidrotermal [8]. Sin embargo, en su mayoría son costosos y no cuentan con un sistema de automatización con la combinación de varios sensores que monitoreen variables físicas, como temperatura, presión o control de agitación, etc. [9].

Tampoco, se encuentra reportado en la literatura una metodología sencilla para su fabricación y que este enfocada a usuarios sin conocimientos profundos en electrónica y programación, quienes deseen no sólo fabricar un equipo hidrotermal, sino busquen adquirir las habilidades para lograr fabricar equipos de laboratorio de mayor complejidad.

Cabe mencionar que un reactor hidrotermal tiene una amplia gama de aplicaciones. Sólo por mencionar algunas, desde la síntesis para celdas solares, la producción de bio-crudo [10], para la conversión de biomasa a hidrógeno [11], entre otras más aplicaciones. Debido a la vasta gama de aplicaciones de un reactor hidrotermal, este se convierte en un dispositivo deseado por el sector educativo y el sector privado. Además, un reactor hidrotermal comercial con un sistema de automatización con agitación, control de

temperatura y presión tiene un elevado precio, esto en comparación con un reactor hidrotermal fabricado por sus propios usuarios. Por lo que, su alto costo impide que la mayoría de las instituciones educativas en México puedan adquirir un equipo comercial. Sin embargo, es posible, mediante la metodología que se propone en este trabajo, fabricar un reactor hidrotermal automatizado utilizando una tarjeta adquisición de datos Arduino.

Dicha tarjeta se desarrolló en Italia en 2005, y se basa en una plataforma electrónica de código abierto, un código de programación sencillo con un precio accesible [12]. La tarjeta Arduino-Uno usa un microcontrolador ATmega328P. Además, esta tarjeta ha sido utilizada para la enseñanza de electrónica [13], en el área de la física educativa [14], para el estudio del movimiento armónico simple [15], el diseño de experimentos de física moderna [16], el estudio de mecanismos de corrosión en superficies metálicas [17], también para la implementación y automatización de equipo de laboratorio [18, 19], entre otras aplicaciones [20, 21]. Finalmente, el gran éxito de esta tarjeta se debe a su manera práctica y sencilla de resolver distintas problemáticas del sector privado y la comunidad científica, llegando a convertirse en una poderosa herramienta.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una metodología sencilla para que usuarios, sin conocimientos profundos en electrónica y programación, logren implementar su propio reactor hidrotermal basado en Arduino. En esta investigación se sintetizaron películas de ZnO:Li. Adicionalmente, mediante este reactor propuesto es posible sintetizar otro tipo de materiales o emplearlo para diferentes aplicaciones, como por ejemplo en celdas solares.

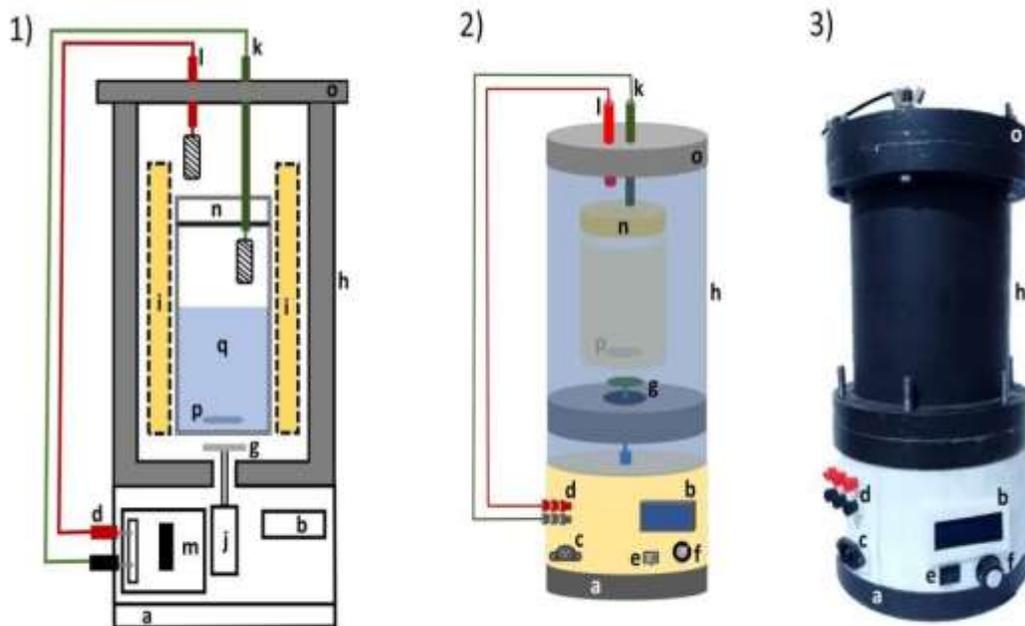
## 2 Materiales y métodos

La metodología para fabricar el reactor hidrotermal, basado en Arduino, se presenta en las primeras secciones de este apartado. En la primera sección se muestra el reactor hidrotermal con su diagrama electrónico y se explica su funcionamiento. Posteriormente se realiza la caracterización mecánica del reactor. Finalmente se realiza la síntesis de las películas de óxido de zinc dopadas con litio.

### 2.1 Reactor hidrotermal

El reactor hidrotermal se muestra en la Fig. 1, y para ser utilizado es necesario colocar dentro del reactor un recipiente de teflón (Fig. 1-1n), con una solución de ZnO. Luego, el

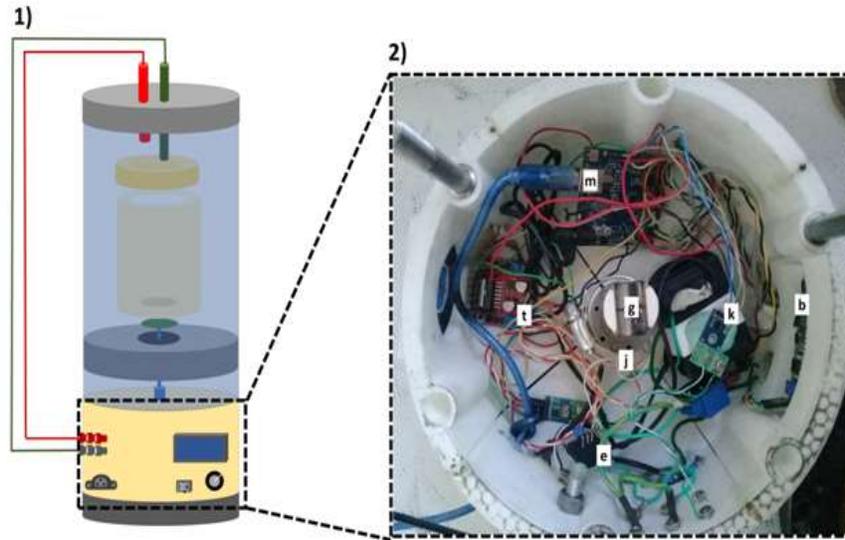
reactor es sellado con una tapa especial (Fig. 1-1o). Posteriormente se activa el interruptor de apagado-encendido (Fig. 1-1e). Entonces, la pantalla LCD (Fig. 1-1b) se enciende y presenta un desplegado de opciones, se selecciona la temperatura, presión y número de revoluciones del imán de neodimio que se desea que el reactor ejecute (Fig. 1-1g). En consecuencia, la pastilla agitadora (Fig. 1-1p) comienza a girar, y la solución de ZnO se empieza a mezclar con el dopante. Después, el reactor comenzará a incrementar su temperatura interna por medio de una resistencia eléctrica (Fig. 1-1i). Sólo bastará esperar a que el reactor llegue a la temperatura y presión previamente programada en la pantalla LCD.



**Figura 1.** 1) Diagrama interno del reactor. 2) Diagrama externo del reactor. 3) Reactor Hidrotermal. a) Base del Reactor, b) Pantalla LCD de programación de temperatura, presión y agitación, c) Conexión de alimentación eléctrica, d) Conectores eléctricos para sensores de temperatura y presión, e) Interruptor de Encendido-Apagado, f) Control para revoluciones de agitación, g) Imán de neodimio, h) Cuerpo del reactor, i) Sistema de calentamiento, j) Motor para movimiento del imán, k) Sensor de temperatura, l) Sensor de presión, m) Tarjeta Arduino, n) Recipiente de Teflón, o) Tapa del Reactor, p) Agitador magnético, q) Solución química.

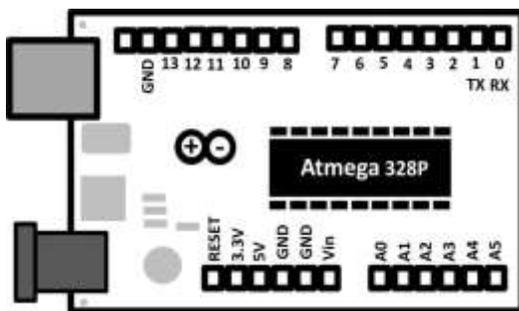
El control de temperatura y agitación se encuentra en la parte baja del reactor (Fig. 2). Además de contener la tarjeta Arduino (Fig. 2-m), con la cual se controla todo el sistema,

y se conecta a un sensor MPX4250AP para monitorear la presión interna, un regulador de voltaje Módulo L298 y un sensor de temperatura MAX6695.



**Figura 2.** Reactor hidrotermal. 1) Visión externa. 2) Configuración electrónica interna. b) Pantalla LCD, e) Interruptor ON / OFF, g) Imán de neodimio, j) Motor DC, k) Sensor de control de temperatura interno, m) Placa Arduino, t) Módulo L298.

En la Fig. 3 se presenta el diagrama de la tarjeta de adquisición de datos Arduino-Uno, la cual fue utilizada para controlar la resistencia eléctrica del reactor y para registrar los distintos valores de presión, temperatura y agitación. Dicha tarjeta debe ser conectada a una fuente de alimentación de 5 Volt, y el código de programación será cargado en la tarjeta utilizando una conexión USB con la computadora.

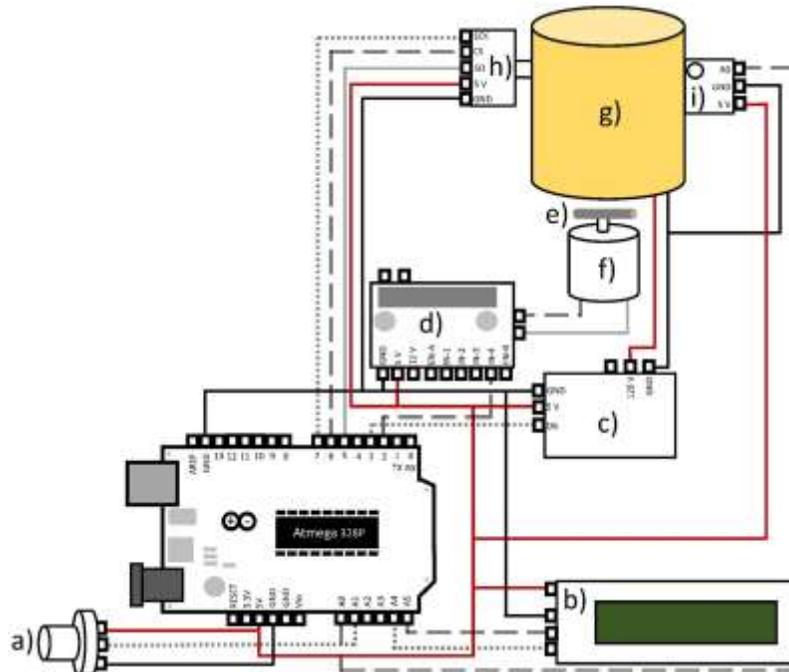


**Figura 3.** Diagrama de una tarjeta de Adquisición de datos Arduino-Uno.

El diagrama electrónico del reactor se muestra en la Figura 4. El reactor utiliza un

sensor MAX6675 (Fig. 4-h) para monitorear la temperatura interna, y un sensor MPX4250AP para monitorear la presión interna (Fig. 4-i).

Una parte novedosa del reactor es el sistema de agitación (Fig. 4-e), a través de un motor de corriente directa y un módulo controlador de motores L298 (Fig. 4-d), conectado a un magneto de neodimio, siendo el magneto el encargado de transmitir el movimiento a la pastilla agitadora. Dicha pastilla estará contenida dentro del recipiente de teflón (Fig. 4-g). Mientras que para incrementar la temperatura interna del reactor se utilizó un WeMos 01 Mini Relay Shield V1 (Fig. 4-c) y una resistencia de tipo banda Mikai. Los valores de presión, temperatura y tiempo son mostrados en la pantalla LCD (Fig. 4-b). También estos datos pueden ser guardados en la PC en tiempo real. El sistema electrónico completo es controlado por la tarjeta de adquisición de datos Arduino.



**Figura 4.** Diagrama electrónico del reactor.

El costo total del reactor, así como de cada componente se muestra en la Tabla 1.

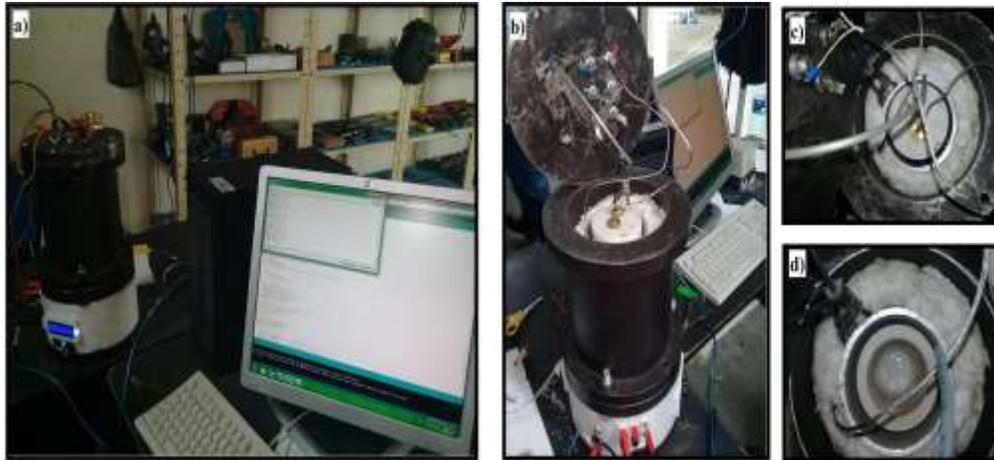
**Tabla 1.** Costo de componentes del reactor.

Componente	Costo (MXN)	Componente	Costo (MXN)
Arduino Uno	\$ 179.00	Carcasa de acero	\$ 3000.00
Sensor MPX4250AP	\$ 200.00	Potenciómetro	\$ 70.00
Sensor MAX6675	\$ 144.00	Recipiente de teflón	\$ 1500.00
Pantalla LCD	\$ 135.00	Magneto de Neodimio	\$ 182.00
Controlador L298	\$ 90.00	Motor DC	\$ 200.00
		<b>Costo Total</b>	<b>\$ 5700.00</b>

Un reactor hidrotermal comercial, con todas las características que se presentan en este trabajo, tiene un costo 6 veces mayor al costo de la Tabla 1.

El reactor consta de un sistema de calentamiento para tres valores distintos de temperatura, 80 °C, 100 °C y 120 °C, los cuales se configuran en la pantalla LCD. La

Fig. 5-a, muestra el reactor en funcionamiento. Después de haber alcanzado la temperatura y presión deseada, el reactor descenderá de temperatura gradualmente, y entonces se podrá retirar la tapa del reactor (Fig. 5-b). Posteriormente, dentro del recipiente de teflón se observa una solución de color blanca, generada a partir del óxido de zinc (Fig. 5-d).



**Figura 5.** a) Registro de valores de temperatura y presión en la computadora. b) Tapa del reactor abierta. d) Solución química después del proceso hidrotérmico.

## 2.2 Caracterización Mecánica del Reactor Hidrotérmico

Las simulaciones para la caracterización mecánica se realizaron mediante un análisis estático con el software solid works ®. Se modeló el reactor hidrotérmico y se utilizó una condición de simetría en el plano vertical y otra en el plano horizontal. El reactor consiste en una cámara cilíndrica de 152 mm de diámetro interior y 228.6 mm de alto, 161.5 mm de diámetro exterior, y tapas planas de 25.4 mm de espesor. La temperatura de síntesis puede alcanzar una temperatura de 104 °C. El material del que se construye el reactor es acero AISI 316L con límite elástico de  $1.7 \times 10^8$  Pa. Considerando un factor de seguridad mínimo de 6, típico para estos reactores.

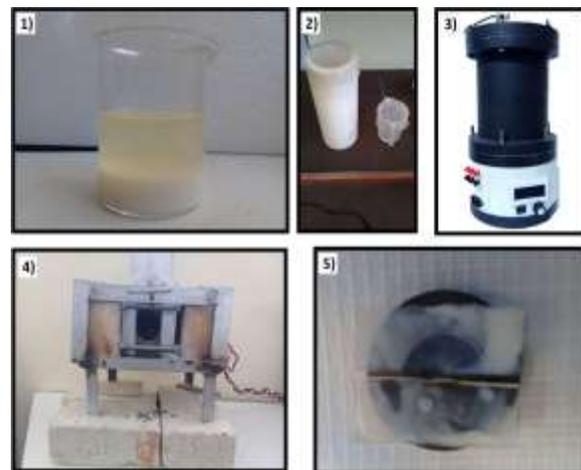
Mientras que el espesor mínimo del recipiente se puede calcular, si se hace la suposición de que el espesor será delgado, con la ayuda de la ecuación 1.

$$t = \frac{D_m p f}{2 \sigma_e} \dots \dots \dots (\text{Ec. 1})$$

En donde  $D_m$  es el diámetro medio del reactor a presión,  $t$  es el espesor,  $\sigma_e$  es el límite de tensión elástica,  $p$  es la presión y  $f$  el factor de seguridad.

## 2.3 Síntesis de las películas de ZnO:Li

Las películas de óxido de zinc dopadas con litio (ZnO:Li) fueron preparadas mediante la mezcla de acetato de zinc, hidróxido de sodio, óxido de litio y agua desionizada (Fig. 6-1). Después dicha mezcla fue vertida en el recipiente de teflón (Fig. 6-2), y luego se utilizó el reactor hidrotérmico (Fig. 6-3). Después se extraen las películas de óxido de zinc dopadas con litio (ZnO:Li) del reactor y se aplica un tratamiento térmico de 300 °C durante 24 horas (Fig. 6-4). Finalmente, se obtienen las películas de ZnO:Li con diferentes concentraciones i) 0.6, ii) 0.2 y iii) 0.05 (Fig. 6-5).



**Figura 6.** Metodología utilizada para la síntesis de películas delgadas de ZnO:Li.

### 3 Resultados y discusiones

#### 3.1 Caracterización Mecánica del Reactor Hidrotermal

La caracterización mecánica del reactor indica que puede llegar a soportar presiones internas de hasta 400 kPa absolutos o 322.6 kPa manométricos, ya que las pruebas se realizaron a 2210 m s.n.m., con una presión atmosférica de 77.4 kPa. También se obtuvo que el espesor mínimo necesario es de 2 mm.

Sin embargo, se dispone de un material de 4.75 mm de espesor. La distribución de esfuerzo y de factor de seguridad se muestran en la Figura 7, en los incisos a) y b), respectivamente. El mayor esfuerzo se encuentra distribuido de manera uniforme en la pared del reactor y alcanza un valor de  $6.6 \times 10^6$  Pa, mientras que el factor de seguridad más pequeño es de 25. En cuanto a las fuerzas, el interior del reactor se sujetó a una presión de 400 kPa absolutos.

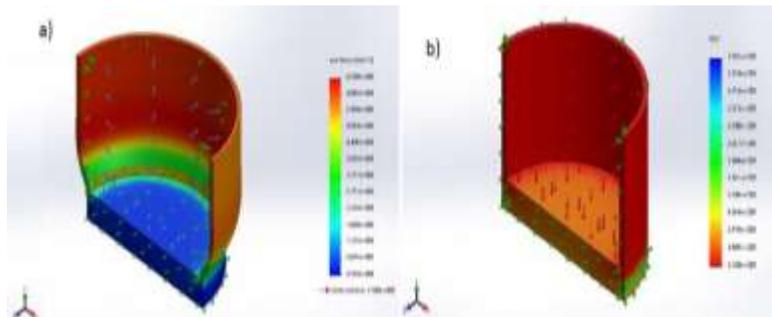


Figura 7. Esfuerzos y factor de seguridad en el reactor.

Por otro lado, para conocer la respuesta del sistema de calentamiento interno del reactor que se propone, primero se midió su temperatura en un rango de 25 °C y 300 °C (Fig. 8). El sistema de calentamiento presenta un comportamiento cuasi-lineal en el rango de temperatura de 28 °C y 260 °C. Por lo

tanto, su respuesta de calentamiento resulta idónea para realizar la síntesis de películas de óxido de zinc y de otros posibles materiales. El sistema de calentamiento se encuentra en la parte lateral del reactor y tiene la etiqueta “1”.

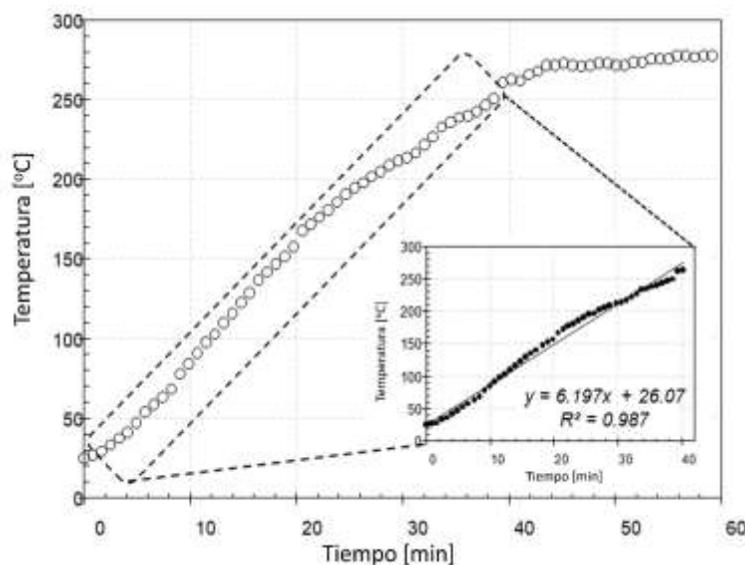
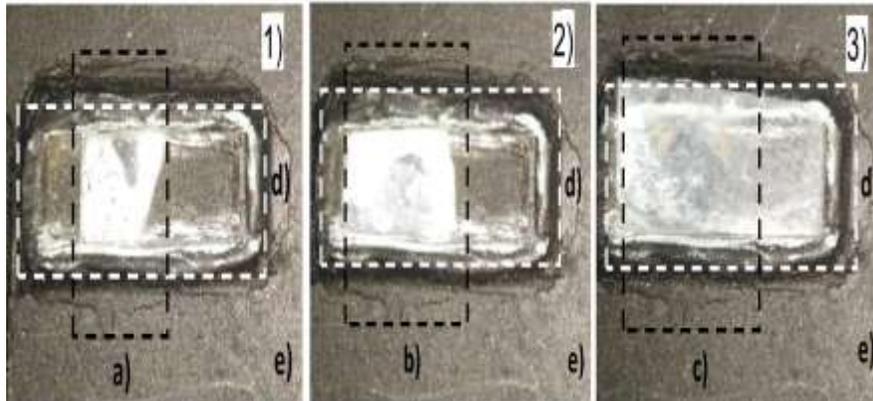


Figura 8. Respuesta de calentamiento de la resistencia eléctrica del reactor.

La Fig. 9 muestra las películas de ZnO:Li sometidas a un tratamiento térmico de 300 °C

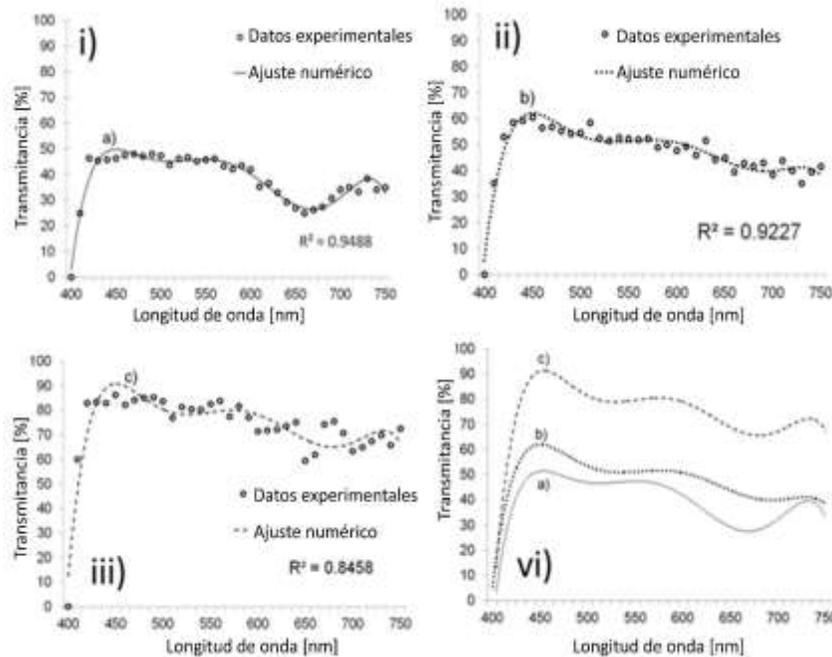
durante 24 horas con concentraciones molares de: i) 0.6, ii) 0.2 y iii) 0.05.



**Figura 9.** Películas de ZnO:Li sometidas a un tratamiento térmico de 300 °C durante 24 horas a) 0.6, b) 0.2 y c) 0.05.

Posteriormente, se determinó la transmitancia de las películas mediante un equipo de espectrofotometría. Los espectros de transmitancia obtenidos se presentan en la Fig. 10. La película de ZnO:Li que presenta mayor transmitancia tiene una molaridad de 0.05 (Fig. 10-iii). Mientras que la película de ZnO:Li con una menor respuesta de transmitancia tiene una molaridad de 0.6 (Fig. 10-i). En la Fig. 10-iv, se comparan en

conjunto los espectros de transmitancia mediante un ajuste numérico. Además, se comparan los espectros de transmitancia con diferentes tratamientos térmicos (Fig. 10-iv). Por lo tanto, es claro una variación de la respuesta de transmitancia con respecto a la concentración de molaridad de litio. Los espectros de transmitancia obtenidos son equivalentes a los reportados en la literatura [7].



**Figura 10.** Respuesta de transmitancia de las películas de ZnO:Li sometidas a un tratamiento térmico de 300 °C durante 24 horas con concentraciones molares de litio de: i) 0.6, ii) 0.2 y iii) 0.05.

Finalmente, los resultados mostrados son los esperados, debido a que el reactor cumple con las normas de seguridad y su uso resulta adecuado para ser implementado en un laboratorio.

#### 4 Conclusiones

La principal contribución de este trabajo se centra en desarrollar una metodología amigable para implementar un reactor hidrotermal de bajo costo basado en Arduino. Esta metodología se enfoca en usuarios sin amplios conocimientos en electrónica y programación, quienes necesitan y desean desarrollar su propio equipo de laboratorio. Mediante esta metodología se evita pagar los altos costos por equipos de laboratorio comerciales. También se busca que instituciones educativas y empresas desarrollen sus propios equipos de laboratorio, de esta manera se fomenta el desarrollo tecnológico en nuestro país. La metodología que se presenta es amigable y sencilla de seguir para usuarios que no cuentan con una formación profesional en electrónica. Finalmente, para la validación del reactor, se determinó la transmitancia de las películas de ZnO dopadas con diferentes concentraciones de Li, dicha respuesta obtenida resulto equivalente a la reportada en la literatura. Por lo cual, el reactor demuestra ser un equipo útil para realizar actividades de investigación, aplicaciones en la industria y para su uso en el desarrollo de celdas solares. Finalmente, la metodología propuesta brinda algunas bases para que los usuarios puedan desarrollar no sólo un reactor hidrotermal, sino equipos de laboratorio de mayor complejidad.

#### 5 Referencias

1. Ceren, E. y Gokhan, O. (2019). "Turkey's 2023 Energy Strategies and Investment Opportunities for Renewable Energy Sources: Site Selection Based on

ELECTRE". *Sustainability*. 11. <https://doi.org/10.3390/su11072136>

2. Ghulam, A., Muhammad, O., Ahmad, K., Faisal, N. (2018). "Recent Challenges of Solar Cell Technologies; A Critical Analysis". *International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1109/RAEE.2018.8706887>

3. Mengda, C., Tao, Z., Yaji, L., Wenyong, Y., Mengjun, M. (2019). "A performance degradation model of solar cells in an on-orbit resource satellite based on peak currents". *Solar Energy*. 189. pp. 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.030>

4. Peña-Bermúdez, J., Gordillo-Guzmán, G. y Piña-Jaramillo, J. (2021). "Desarrollo de un reactor para la producción automatizada de películas delgadas de óxido de zinc por evaporación reactiva asistida por plasma, para ser usadas en la fabricación de celdas solares de área grande". *Ciencia transdisciplinaria para el desarrollo y la supervivencia de la humanidad*. pp. 40-51. <http://doi.org/10.5281/zenodo.5139646>

5. Koopman, P., Choset, H., Gandhi, R., Krogh, B., Marculescu, D., Narasimhan, P., Paul J. M., Rajkumar, R., Siewiorek, D., Smailagic, A., Steenkiste, P., & Thomas D. E., & Wang C. (2005). "Undergraduate Embedded System Education at Carnegie Mellon". *Transactions on Embedded Computing Systems*, 4(3), pp. 500-528. <https://doi.org/10.1145/1086519.1086522>

6. K. Byrappa, M. Yoshimura. (2001). "Handbook of Hydrothermal Technology". A Technology for Crystal Growth and Materials Processing, Noyes Publications New Jersey.

7. Yoshimura, M. and Byrappa, K. (2008). "Hydrothermal processing of materials: past, present and future". *J. Mater Sci*. 43. pp.

2085–2103. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1853-x>

8. Qiang Wang, Selina Vi Yu Tang, Edward Lester and Dermot O'Hare. (2013). "Synthesis of ultrafine layered double hydroxide (LDHs) nanoplates using a continuous-flow hydrothermal reactor". *Nanoscale*, 5, pp. 114-117. <https://doi.org/10.1039/C2NR32568C>

9. Randall E., Russell, J., Philip R., Shawn E., Coleman, M., Kidd, R. and Isik K. (2010). "Design, Fabrication, and Test of a Hydrothermal Reactor for Origin-of-Life Experiments". *Astrobiology*. 10, 8. <https://doi.org/10.1089/ast.2009.0456>

10. Hugang, L., Zhangbing, Z., Jianwen, L., Jamison, W., Deliang, K., Kai, W., Yuanhui, Z. and Zhidan, Liua. (2020). "Establishment and performance of a plug-flow continuous hydrothermal reactor for biocrude oil production". *Fuel*, 280, 15. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118605>

11. Vedenina, A., Vityaz, P., Ivanova, I., Mazalova, Y. Pustovgar, P. and Sudnikd, V. (2018). "Experimental investigation of thermal insulating aerogel composites of hydrothermal reactor for biomass-to-hydrogen conversion". *International Journal of Hydrogen Energy*. 43, 14, pp. 6899-6903. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.025>

12. El-Abd, M. (2017). "A Review of Embedded Systems Education in the Arduino Age: Lessons Learned and Future Directions". *International Journal of Engineering Pedagogy*, 7(2), pp. 79-93. <https://doi.org/10.3991/ijep.v7i2.6845>

13. Zachariadou, K., Yiasemides, K. y Trougakos, N. (2012). "A low-cost computer-controlled Arduino-based educational laboratory system for teaching

the fundamentals of photovoltaic cells". *European Journal of Physics*, 33, pp. 1599–1610. <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/33/6/1599>

14. Calin G., Cheryl L. y Geoffrey E. (2015). "An Arduino Investigation of the RC Circuit". *The Physics Teacher*, 53, pp. 285-288. <http://dx.doi.org/10.1119/1.4917435>

15. Calin, G., Scott E. y Geoffrey E. (2014). "An Arduino Investigation of Simple Harmonic Motion". *The Physics Teacher*, 52, pp. 157-159. <https://doi.org/10.1119/1.4865518>

16. Calin, G. (2013). "An Arduino-Controlled Photogate". *The Physics Teacher*, 51, pp. 156-158. <https://doi.org/10.1119/1.4792011>

17. Grassini, S., Corbellini, S., Parvis, M., Angelini, E. y F. Zucchi. (2016). "A simple Arduino-based EIS system for in situ corrosion monitoring of metallic works of art". *Measurements*. 14, pp. 508-514. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.014>

18. Durán-Muñoz, H., Hernández-Ortíz, M., Sifuentes-Gallardo, C., y Meneses-Castaño, V. (2018). "Comparative study of kinetic parameters induced by different excitation sources: using a novel and user-friendly glow curve deconvolution spreadsheet". *Journal of Material Science: Materials in Electronics*. 29, pp. 15732–15740. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9226-6>

19. Guzmán-Fernández, M., Zambrano de la Torre, M., Ortega-Sigala, J (2021). "Arduino: a Novel Solution to the Problem of High-Cost Experimental Equipment in Higher Education". *Exp. Tech*. 45, pp. 613–625. <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00449-1>

20. Corazza, M., García-Valverde, R., Henrik, F., Madsen, M., Hösel, M., Benatto,

G., Beliatis, M., Pastorelli, F., Veenstra, S., Knelissen, Galagan, Y., Roesch, R., Faber, T., Hoppe, H., Berson, S., Manceau, M., Chaperon, M., Castro, F., Blakesley, J. (2019). "Compact multifunctional source-meter system for characterisation of laboratory-scale solar cell devices". *Measurement Science and Technology*, 30. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6501/aafae4>

21. Gunawardena, N., Pardyjak, E., Stoll, R., y Khadka, A. (2018). "Development and evaluation of an open-source, low-cost distributed sensor network for environmental monitoring applications". *Measurement Science and Technology*, 29. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6501/aa97fb>