

# Diseño y construcción de un equipo para crear películas delgadas de semiconductores utilizando la técnica de centrifugado

**RESUMEN:** En este proyecto de investigación y desarrollo tecnológico se analizó, diseñó y construyó un equipo para crear películas delgadas de semiconductores utilizando la técnica de centrifugado cuyo objetivo ha sido controlar variables independientes tal como la velocidad y tiempo del proceso para generar películas delgadas con diferentes espesores las cuales se analizan para determinar su eficiencia en la elaboración de celdas solares. Se utilizó una metodología de desarrollo tecnológico la cual ha consistido en las siguientes etapas: Análisis del problema, diagnóstico y pronóstico de tecnologías, diseño, desarrollo y evaluación.

Para la realización de este proyecto se analizaron diferentes alternativas tecnológicas para su desarrollo y como resultado se obtuvo un equipo que utiliza la técnica de centrifugado para la elaboración de películas delgadas de semiconductores con diferentes espesores lo cual se logra controlando las variables de velocidad y tiempo de acuerdo con su análisis matemático. El espesor está relacionado directamente con las características eléctricas y ópticas, el control de la velocidad tiene un rango de 0-10,000 rpm, la adquisición de datos y el control del sistema es digital, el tiempo no es una variable crítica ya que se utilizan periodos menores a 30 minutos para la obtención de películas delgadas.

**PALABRAS CLAVE:** Semiconductor, Películas delgadas, Técnica de centrifugado, Espesor de películas delgadas, Características eléctricas de películas delgadas.



## Colaboración

Silvia Patricia Gutiérrez Fonseca; Francisco Javier Rivera Medinilla; Marco Antonio Molina González; Perla Inés Proaño Grijalva; José Nahúm Ledezma Mercado, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Agua Prieta

**Fecha de recepción:** 08 agosto del 2023

**Fecha de aceptación:** 08 de noviembre del 2023

**ABSTRACT:** In this research and technological development project, device was analyzed, designed and built to create thin films of semiconductors using the centrifugation technique whose objective has been to control independent variables such as the speed and time of the process to generate thin films with different thicknesses. which are analyzed to determine their efficiency in the production of solar cells. A technological development methodology was used which consisted of the following stages: Problem analysis, diagnosis and forecast of technologies, design, development and evaluation.

To carry out this project, different technological alternatives were analyzed for its development and as a result, device was obtained that uses the centrifugation technique to produce thin films of semiconductors with different thicknesses, which is achieved by controlling the speed and time variables of according to his mathematical analysis. The thickness is directly related to the electrical and optical characteristics, the speed control has a range of 0-10,000 rpm, the data acquisition and system control is digital, time is not a critical variable since periods are used. less than 30 minutes to obtain thin films.

**KEYWORDS:** Semiconductor, Thin films, Spinning technique, Thickness of thin films, Electrical characteristics of thin films.

## INTRODUCCIÓN

Durante la pandemia originada por el COVID-19 se originaron diversos problemas a nivel internacional que afectaron a diferentes empresas uno de ellos fue la escasez y

alta demanda de semiconductores que frenaron el desarrollo de diversos sectores incluyendo el automotriz [1]. Los mayores fabricantes de semiconductores se encuentran en otros continentes, en consecuencia, Estados Unidos busca diferentes alternativas para atender el desabasto de semiconductores para reducir vulnerabilidades que puedan causar interrupciones en la producción y desarrollo en sectores críticos, como el automotriz. Por tal motivo busca incrementar la producción de semiconductores en América del Norte [2].

Una de las estrategias es la creación de un clúster de Semiconductores en Arizona, en el cual participará México específicamente con la propuesta del Plan Sonora, el cual invita a las instituciones educativas a participar en acciones que desarrollen el talento humano y con proyectos tecnológicos que apoyen a la industria de semiconductores con el objetivo de fortalecer la logística y cadena de suministro de la industria tecnológica y el desarrollo económico en nuestro país [3].

Considerando dos aspectos relevantes del Plan Sonora, energía limpia y semiconductores, se propone un desarrollo tecnológico el cual consiste en el diseño y construcción de un equipo para la elaboración de películas delgadas de semiconductores. utilizando la técnica de centrifugado el cual permita controlar variables independientes tal como la velocidad y el tiempo del proceso para generar películas delgadas con diferentes espesores con el objetivo de determinar su eficiencia para la elaboración de celdas solares.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Las películas delgadas son capas de material muy delgado que se utilizan para analizar las propiedades de diferentes materiales y tienen un espesor que va desde los nanómetros hasta los micrómetros. Durante su elaboración se depositan sobre otro material sólido llamado sustrato el cual se utiliza para contener la película, estas películas son demandadas en la industria, fundamentalmente, en la óptica y la electrónica. Las características importantes de una película delgada son:

- Su grosor, el cual puede variar desde una sola capa de átomos hasta varias micras.
- Su composición química, que en ciertos casos tienen estequiometrías muy complejas.
- Su estructura y microestructura cristalina.

Los métodos para elaborar películas delgadas son métodos físicos, físicos-químicos, químicos en fase gaseosa y químicos en fase líquida. De los métodos anteriores se utilizó el método físico el cual incluye la técnica mecánica de centrifugado, la cual consiste en depositar una pequeña cantidad de líquido en

el centro de la superficie del sustrato, que luego se somete a una gran velocidad angular. La aceleración centrífuga, hace que el líquido se difunda hacia el borde del sustrato, dejando una película delgada sobre el sustrato. El espesor final de la película y otras propiedades dependerán de dos factores, la naturaleza de la resina y los parámetros elegidos para el giro, como la velocidad angular y el tiempo [4]. La técnica consta de las siguientes etapas: Vertido, Rotación, Desaceleración y Evaporación. Cada una de las etapas antes mencionadas involucra la presencia de diferentes variables, cuyas características estarán directamente ligadas a las propiedades de la película obtenida [5].

Existen diversos modelos matemáticos para determinar el espesor final de una película delgada involucrando diferentes variables para diferentes velocidades angulares. El primero de ellos fue presentado por Emslie, Bonner y Pecken en 1958, este modelo se representa por la ecuación 1, el cual realiza aproximaciones del espesor ignorando los efectos de la evaporación esto significa que se asume que la viscosidad del fluido utilizado no cambiará por la tensión.

$$h = \frac{h_o}{(1 + \frac{4\rho\omega^2}{3n} h_o^2 t)^{1/2}} \quad \text{Ec. (1)}$$

El espesor de las películas delgadas semiconductoras afecta directamente a sus propiedades físicas, mecánicas térmicas y químicas [6].

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto consistió en los siguientes pasos:

## Análisis del problema

Se realizó un análisis para determinar los requerimientos específicos para el diseño del equipo para realizar películas delgadas utilizando la técnica de centrifugado:

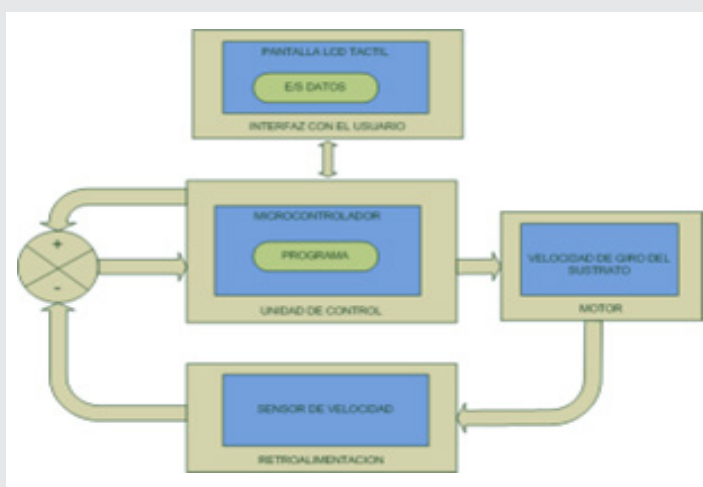
- Velocidad de rotación de 0 a 10,000 rpm.
- Control de velocidad y tiempo inicial
- Control de velocidad y tiempo final.

## Diagnóstico y pronóstico de tecnologías

En esta etapa se realizó una búsqueda de publicaciones científicas y registro de patentes relacionadas con el diseño del equipo y se encontraron algunos desarrollos tecnológicos con diferentes características que no cumplieron con los requerimientos solicitados. Asimismo, se analizaron las características de equipos comerciales que existen actualmente en el mercado.

## Diseño

Para el diseño electrónico de este proyecto primero se propusieron diferentes soluciones al problema y se propuso el sistema general mostrado en la Figura 1.



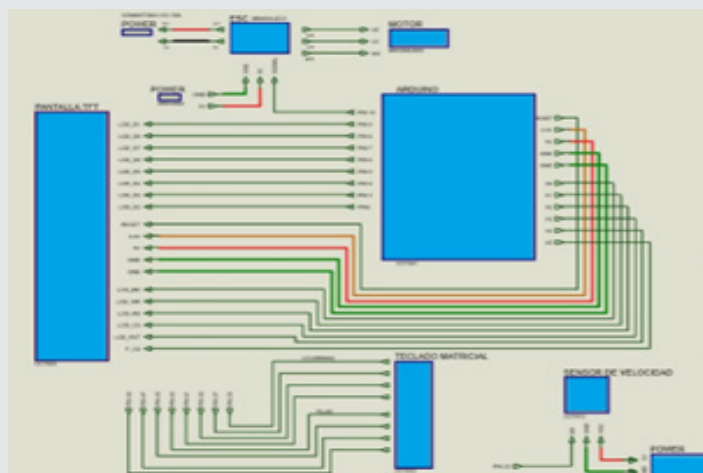
**Figura 1. Diseño a bloques del sistema de control del equipo.**  
Fuente: Elaboración propia.

Para cada etapa se analizaron las diferentes alternativas tecnológicas para seleccionar la propuesta más adecuada valorando todos los parámetros de control disponibles estableciendo un equilibrio entre calidad y precio. Para lo cual se investigó y comparó el principio de funcionamiento y características principales incluyendo ventajas y desventajas de los componentes básicos como son el microcontrolador, motor, sensor de velocidad y fuente de voltaje para estar en condiciones de elegir los más adecuados para el proyecto.

Para el diseño del contenedor físico o carcasa se tomaron las medidas de los diferentes componentes para realizar un diseño personalizado en el software solids works.

**Desarrollo**

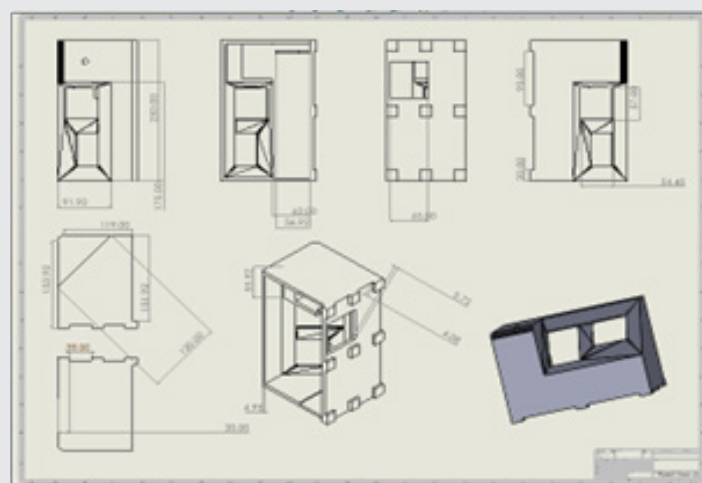
En la etapa de desarrollo se construyó el equipo, utilizando los componentes seleccionados en la etapa anterior y siguiendo el diagrama electrónico mostrado en la Figura 2.



**Figura 2. Diagrama electrónico del equipo.**  
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente a la conexión de componentes se inició con el desarrollo del programa del microcontrolador Arduino Mega que realiza el control de las variables de funcionamiento del equipo y se realizaron varias pruebas con los elementos principales. Primero se analizó el comportamiento del motor y su control por pulsos PWM para encontrar una relación directa entre el periodo (T) en unidades de milisegundos y la velocidad del motor en rpm en donde se estableció un rango de 1000 a 2,000ms para un rango de control de velocidad de 0 a 10,000rpm. Posteriormente se verificó el funcionamiento de la pantalla táctil en donde se ajustaron los parámetros de brillo, color, orientación, tamaño de letra, fondo, posición de cursor, tiempo de actualización y sensibilidad para determinar la presión táctil hasta obtener una interfaz amigable al usuario. Al final se realizaron pruebas del lazo de control retroalimentado con la medición del sensor de velocidad para verificar la salida con respecto a la velocidad establecida, durante estas pruebas se observó que los valores coincidían, sin embargo, cuando se aplica una carga, es decir, cuando se coloca el sustrato de vidrio y su soporte, existe un pequeño error menor al 2%. Una vez realizado todos estos ajustes se obtuvo el programa final que cumplió con los requisitos de control de velocidad y tiempo, así como una interfaz fácil de usar y con un diseño amigable a la vista.

Asimismo, se imprimió una estructura con plástico PLA cuyo plano en solid Works se muestra en la Figura 3.



**Figura 3. Plano de la estructura.**  
Fuente: Elaboración propia.

También se agregó a la estructura un soporte para fijar el sustrato, la cual permitió fijarlo fuertemente de una manera segura. En la parte superior del gabinete se realizaron unas perforaciones para colocar la pantalla LCD táctil y el teclado. En la parte trasera se montó un conector de alimentación de 220V con interruptor integrado y en el interior se montaron, la placa principal y la fuente de alimentación.

## Evaluación

Una vez desarrollado el equipo se evaluó su funcionamiento con el objetivo de detectar y corregir posibles errores. Para esta etapa se realizarán varias pruebas para determinar el correcto funcionamiento del proyecto y al mismo tiempo verificar el cumplimiento de los objetivos. Durante la evaluación se observó que el funcionamiento del equipo fue adecuado, sin embargo, se determinó que el diseño no era ergonómico y que se podían realizar mejoras al contenedor.

## RESULTADOS

Para probar el funcionamiento correcto del equipo para crear películas delgadas utilizando la técnica de centrifugado se realizaron las pruebas físicas, para lo cual se colocó un sustrato de vidrio en el soporte mostrado en la Figura 4, para verificar que se realizaba una sujeción fuerte y segura.

y espesores deseados. En la Figura 5 se muestra la primera versión del equipo construido.



Figura 5. Equipo para crear películas delgadas de semiconductores.

Fuente: Elaboración propia.

El equipo estuvo en funcionamiento de manera continua durante 40 minutos y no se presentó sobrecalentamiento de los componentes del circuito.

Siendo la velocidad un factor crítico, se utilizó un tacómetro digital adicional para medir y comparar las mediciones del tacómetro con las proporcionadas por el sensor de velocidad incorporado en el equipo. Al comparar las mediciones se observó que existe un error de desviación mínimo del 2%.



Figura 4. Soporte del sustrato de vidrio.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se encendió el equipo y se capturó en la pantalla táctil la información del tiempo y velocidad inicial, tiempo y velocidad final. En la primera etapa de vertido se colocó una pequeña cantidad de líquido del material semiconductor en el sustrato de vidrio y se ajustó a unos parámetros iniciales pequeños de un tiempo de 10 segundos y una velocidad de 500 rpm los cuales fueron suficientes para esta etapa. En la etapa de rotación, el tiempo y velocidad final son mayores para permitir que el material se difunda y se genera la película delgada cuyo grosor tiene una dependencia directa con la velocidad angular tal como se describe en la ecuación 1, a mayor velocidad menor grosor. La velocidad máxima proporcionada por el equipo es de 10,000rpm y se ajustó a un tiempo promedio de 10 minutos lo cual fue suficiente para crear una película delgada. Los parámetros de velocidad y tiempo en las etapas de vertido y rotación pueden cambiar dependiendo de las características específicas de los componentes

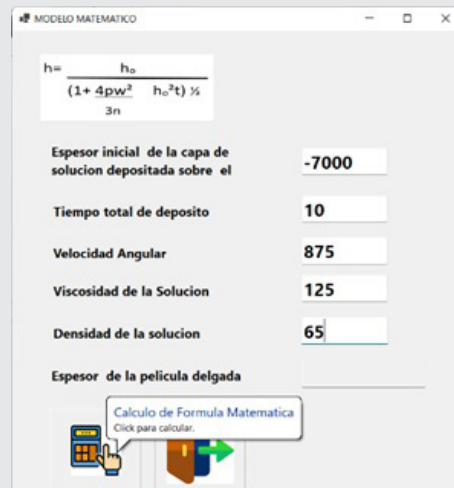


Figura 6. Interfaz de modelo matemático.

Fuente: Elaboración propia.

También se elaboró una aplicación de la ecuación 1, cuya interfaz se muestra en la Figura 6.

En este programa se puede capturar la información básica del líquido semiconductor a utilizar para determinar el grosor de la película que se va a diseñar. La segunda función es que permite capturar el grosor deseado e indica como resultado la velocidad necesaria para capturarla como dato de entrada del equipo.

## CONCLUSIONES

El resultado de este proyecto de investigación y desarrollo tecnológico fue el análisis, diseño y desarrollo de un equipo para crear películas delgadas de semiconductores utilizando el método físico con la técnica mecánica de centrifugado, se realizaron las pruebas necesarias al equipo para verificar su correcto funcionamiento y el cumplimiento con los requerimientos establecidos manteniendo un equilibrio entre calidad y precio. Los requerimientos solicitados fueron control digital de tiempo y velocidad para las etapas de vertido y rotación con una capacidad de velocidad mayor a los equipos comerciales de 7500rpm, y un rango de tiempo mayor a 10 minutos. En relación con el diseño del contenedor y la distribución de los componentes de manera interna no eran los más adecuados y ergonómicos, ya que al colocar los componentes de manera vertical la altura del contenedor no era adecuada para su fácil transportación también se observó que la ubicación del teclado no permitía visualizar al mismo tiempo la información en la pantalla, por tal motivo se propusieron mejoras y se está trabajando en una segunda versión.

El objetivo de nuestra investigación se limitó al diseño y construcción del equipo para crear películas delgadas, la etapa siguiente es realizar las mediciones del grosor de las películas delgadas y sus características eléctricas para lo cual es necesario un equipo especializado tal como un microscopio electrónico de barrido y un espectroscopio.

Como integrantes de un cuerpo académico participamos en la solución de problemas con la integración de sistemas electrónicos para dar respuesta a necesidades emergentes incluyendo el desarrollo del capital humano con nuestros estudiantes.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Padilla, A. (2022). El reto de la escasez de semiconductores y otros insumos. Obtenida el 13 de febrero del 2023 de la página electrónica: <https://www.forbes.com.mx/el-reto-de-la-escasez-de-semiconductores-y-otros-insumos/>.

[2] Morales, R. (2022). SE: incentivos de producción de EU para producción de chips abren

oportunidades para México. Obtenida el 20 de febrero del 2023 de la página electrónica: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Mexico-tiene-oportunidades-con-paquete-de-EU-por-50000-millones-de-dolares-en-semiconductores-20220809-0049.html>.

[3] Plan Sonora ofrece alternativas educativas a estudiantes de México: Alfonso Durazo. (2023). Obtenida el 30 de mayo del 2023 de la página electrónica: <https://www.24-horas.mx/2023/05/27/plan-sonora-ofrece-alternativas-educativas-a-estudiantes-de-mexico-alfonso-durazo/>.

[4] N.H. Rased, B. Vengadaesvaran, S.R.S. Raihan, N.A. Rahim. (2021). Introduction to solar energy and its conversion into electrical energy by using dye-sensitized solar cells, Energy Materials, Elsevier, Pages 139-178, ISBN 9780128237106, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128237106000066>.

[5] Griffin, J., Hassan, H., & Spooner, E. (2022). Spin Coating: Complete Guide to Theory and Techniques. Obtenida el 20 de febrero del 2023 de la página electrónica: <https://www.ossila.com/pages/spin-coating>.

[6] Xiaofang Ch., Yaoxin H., Zongli X., Huanting W., (2018), Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes, Elsevier, Pages 71-96, ISBN 9780128135495, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128135495000037>.