

Dispositivo de recubrimiento por centrifugación de bajo costo y alto rendimiento para la fabricación de películas delgadas

B. Sánchez Bautista ^{a,*}, J. Anaya Contreras  ^b^a Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.^b Escuela Superior de Ciudad Sahagún, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Se presenta el diseño, la construcción y la caracterización funcional de un prototipo de máquina de recubrimiento por centrifugación (spin coater) de bajo costo, desarrollado para abordar la inaccesibilidad de la instrumentación comercial de alto valor. El dispositivo utiliza una arquitectura de hardware abierto que integra componentes comerciales asequibles (COTS) con piezas estructurales fabricadas mediante impresión 3D con ABS. El control del equipo se centra en el microcontrolador STM32F401RE con programación a nivel de registros (Bare Metal), garantizando una máxima eficiencia y un control preciso del motor Brushless A2212, el cual es gestionado por un ESC de 30A BLDC. Un sensor digital de Efecto Hall (KY-003) implementa la medición de la velocidad de lazo cerrado, proporcionando lecturas de RPM en tiempo real para mantener la estabilidad necesaria en la fabricación de películas delgadas. La funcionalidad validada establece una alternativa viable y reproducible que optimiza la relación precisión-costo, con potencial para ser adoptada en laboratorios de investigación y docencia con presupuesto limitado.

Palabras Clave: Recubrimiento, Bajo-Costo, Registros, Películas, STM32,

Abstract

The design, construction, and functional characterization of a low-cost, open-source spin coater prototype are presented, developed to address the inaccessibility of high-value commercial instrumentation. The device employs an open-hardware architecture integrating affordable Commercial Off-the-Shelf (COTS) components with structural parts manufactured using ABS 3D printing. Equipment control centers on the STM32F401RE microcontroller with register-level (Bare Metal) programming, ensuring maximum efficiency and precise control of the Brushless A2212 motor, which is managed by a 30A BLDC ESC. A digital Hall effect sensor (KY-003) implements closed-loop speed measurement, providing real-time RPM readings to maintain the stability required for thin-film fabrication. The validated functionality establishes a viable and reproducible alternative that optimizes the precision-to-cost ratio, with potential for adoption in resource-limited research and teaching laboratories

Keywords: Coat, Low-Cost, Registers, Films, STM32

1. Introducción

La tecnología de películas delgadas juega un papel fundamental en diversas industrias de alta tecnología y se considera un componente esencial en la nanofabricación y microfabricación de dispositivos. Las películas delgadas se definen como capas de materiales con un espesor que puede variar desde partes de nanómetros hasta varios micrómetros. Debido a sus propiedades únicas como sistemas bidimensionales, su conocimiento y diseño han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías. Estas estructuras son ampliamente utilizadas en aplicaciones críticas, tales como:

- Dispositivos optoelectrónicos y electrónicos (incluyendo diodos emisores de luz).
- La fabricación de celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSCs) y otros dispositivos fotovoltaicos.
- El desarrollo de sensores de gas y dispositivos de memoria.
- La ciencia de materiales y los semiconductores.

*Autor para la correspondencia: villafruerte@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: villafruerte@uaeh.edu.mx (Raúl Villafruete-Segura), ravila@uaeh.edu.mx (Roberto Ávila-Pozos),... nombres completos y emails de todos los autores hasta aceptación.

Historial del manuscrito: recibido el DD/MM/AAAA, última versión-revisada recibida el DD/MM/AAAA, aceptado el DD/MM/AAAA, en línea (postprint) desde el DD/MM/AAAA, publicado el DD/MM/AAAA. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.vXXiYY.ZZZZ>



Técnica Específica: Recubrimiento por Centrifugación (Spin Coating)

Para la deposición de estas capas a escalas micrométricas y nanométricas, el recubrimiento por centrifugación (spin coating) es una de las técnicas más comunes. El proceso es reconocido como un método rápido, simple y muy utilizado para aplicar películas delgadas uniformes a sustratos planos. El mecanismo de spin coating inicia depositando una cantidad limitada de la solución de recubrimiento en el centro de un sustrato, que puede estar en reposo o girando lentamente (deposición estática o dinámica). Inmediatamente después, el sustrato se acelera a una velocidad deseada. La fuerza centrífuga dispersa la solución líquida a través de la superficie y expulsa el exceso radialmente, mientras que la evaporación del solvente solidifica el recubrimiento en una película delgada. La sencillez y consistencia del método para obtener resultados precisos lo hacen un método preferido en diversos campos. Entre sus ventajas principales se encuentran la alta uniformidad de las películas, la compatibilidad con sustratos grandes y pequeños, el bajo costo relativo del proceso, y que generalmente no requiere conocimiento experto para su operación. Además, el espesor final del film puede controlarse eficazmente ajustando la velocidad de centrifugación y la viscosidad de la solución.

1.1. Identificación del Problema

A pesar de la relativa simplicidad de la técnica, el costo de entrada para las máquinas de spin coating comerciales puede ser prohibitivo. El precio de estos equipos puede variar considerablemente, desde aproximadamente 500 € para unidades básicas hasta decenas de miles de euros para máquinas industriales automatizadas, siendo 2000 € un precio inicial común para los modelos destinados a la investigación y bajo volumen de producción. Este alto valor de adquisición se atribuye a la inclusión de componentes sofisticados y características de alto nivel, como sistemas de control programados electrónicamente para la aceleración y la velocidad, bombas de vacío, pantallas táctiles, dispensación automática de líquidos y materiales resistentes a la corrosión, como el PTFE. Este costo y sofisticación actúan como una barrera significativa, limitando el acceso a esta tecnología a laboratorios de investigación, universidades o instituciones en países en desarrollo con presupuestos limitados. De hecho, incluso las unidades comerciales consideradas "asequibles" a veces han demostrado ser poco confiables y propensas a fallas, particularmente en sus sistemas de vacío.

1.2. Solución Propuesta

Para contrarrestar la inaccesibilidad de los equipos comerciales, la investigación se ha centrado en el desarrollo de alternativas de hardware de código abierto y bajo costo. El desarrollo de prototipos de spin coater basados en el enfoque Do-It-Yourself (DIY) ha utilizado componentes asequibles y disponibles comercialmente (COTS, por sus siglas en inglés). Los enfoques comunes documentados en la literatura incluyen:

- El uso de motores DC sin escobillas (BLDC), a veces motores síncronos de imán permanente

(PMSM) genéricos de drones o motores recuperados de discos duros (HDD), que ofrecen un amplio rango de velocidades, de 350 a 10,000 RPM.

- El empleo de microcontroladores de bajo costo y código abierto, como Arduino Uno, Arduino Nano o ESP32, para gestionar el control electrónico de velocidad (ESC) y la secuencia de recubrimiento.
- La fabricación de carcasa, contenedores de residuos de fluidos (vase) y soportes de sustrato (chucks) mediante impresión 3D, lo que minimiza la complejidad y el costo.
- El desarrollo de sistemas de sujeción no dependientes del vacío, como los chucks de gravedad o la reutilización de equipos como las centrifugadoras de hematocrito para sistemas de vacío simplificados, eliminando así los puntos de falla comunes asociados a los sistemas comerciales.

En este contexto, y en respuesta a la persistente necesidad de instrumentación científica asequible y confiable en entornos de investigación con recursos limitados, este artículo presenta el diseño, la construcción y la validación de un prototipo de spin coater de bajo presupuesto. El dispositivo integra componentes COTS, como un motor PMSM/BLDC y un microcontrolador, con piezas mecánicas fabricadas mediante impresión 3D, enfocado en optimizar la relación entre precisión, replicabilidad y costo total. Se busca ofrecer una alternativa de hardware abierto que no supere los 100€/120 USD y que demuestre la capacidad de producir películas delgadas de alta calidad con una precisión de velocidad superior (>95% en los prototipos validados) para su uso en diversas aplicaciones.

Para clarificar la importancia de buscar alternativas, se puede pensar en el equipo de spin coating comercial de alta gama como un reloj suizo de precisión, sofisticado y costoso de adquirir y mantener, mientras que las alternativas de bajo costo que integran microcontroladores e impresión 3D actúan como un reloj digital de cuarzo bien calibrado: ofrecen la precisión esencial requerida para el trabajo, pero a una fracción del costo y con la ventaja de ser fácilmente reparables con piezas estandarizadas.

2. Metodología

Para garantizar la replicabilidad y demostrar la naturaleza de bajo costo del equipo, la metodología se divide en cuatro subsecciones principales: el diseño mecánico, la arquitectura electrónica, el desarrollo del firmware y el proceso de validación.

2.1. Diseño Mecánico y Estructural

El diseño de la carcasa (chasis) y los soportes internos se realizó mediante el software SolidWorks. Se seleccionó el polímero ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) para la impresión de la carcasa, debido a su mayor resistencia mecánica y térmica en comparación con el PLA, asegurando la durabilidad del prototipo.

El componente central es el motor Brushless A2212 (KV2200), elegido por su alta relación potencia-peso y capacidad para alcanzar altas velocidades de rotación requeridas en la técnica de spin coating.

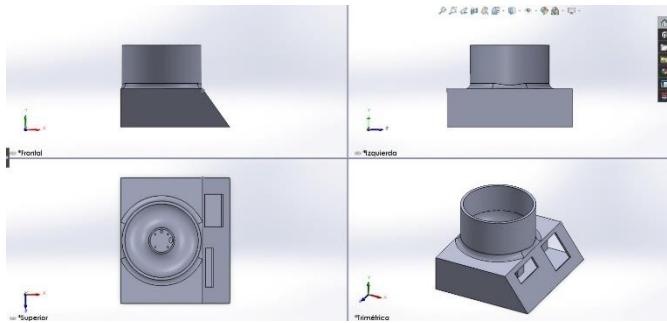


Figura 1 Diseño 3D

2.1.1. Diseño del Chuck

El chuck (plato de sujeción de la muestra) fue diseñado a partir de un archivo 3D de referencia de una empresa comercial (Ossila). Este diseño se adaptó para incluir un sistema de sujeción específico para portaobjetos estándar.



Figura 2 Diseño del Chuck

2.2. Arquitectura Electrónica

El dispositivo se basa en una arquitectura electrónica de bajo nivel enfocada en el control preciso de periféricos.



Figura 3 Componentes utilizados

- Unidad Central de Procesamiento (CPU): El control y la lógica principal son manejados por el microcontrolador STM32F401RE.
- Etapa de Potencia: El motor brushless es controlado por un ESC (Electronic Speed Controller) de 30A BLDC, que se encarga de commutar las fases del motor de manera eficiente, recibiendo la señal de control directamente del microcontrolador.
- Interfaz Humano-Máquina (HMI): La interacción del usuario se realiza mediante:
 - Un display LCD 16x2 con comunicación I2C, utilizado para mostrar la velocidad actual (RPM), el tiempo restante y los parámetros de programación.
 - Un teclado matricial 4x4 para la introducción de los parámetros de centrifugado (velocidad y tiempo).
 - Un botón físico de paro de emergencia para detención inmediata.
- Sensor de Velocidad: Se implementó un sistema de medición de velocidad de lazo cerrado mediante un sensor digital de efecto Hall (KY-003). Un imán se monta directamente en el chuck, permitiendo que el microcontrolador mida la frecuencia de rotación para obtener las RPM en tiempo real.

2.3. Firmware y Lógica de Control

El firmware del microcontrolador fue desarrollado en lenguaje C utilizando el entorno STM32CubeIDE.

2.3.1. Programación a Nivel de Registros

Un elemento diferenciador de este proyecto es la implementación de la programación a nivel de registros (Bare Metal) en el STM32. Esta técnica evita el uso de librerías de abstracción de hardware (HAL), logrando:

- Máxima eficiencia y velocidad de ejecución.
- Control total sobre los periféricos.
- Reducción del tamaño del código.

2.3.2. Uso de Periféricos Clave

El control del sistema se basa en la gestión de los siguientes periféricos:

- PWM: Utilizado para generar la señal de control del ESC y, consecuentemente, la velocidad de rotación del motor.
- Timers: Se emplean para la gestión del tiempo de centrifugado y para la medición precisa de las RPM mediante la interrupción generada por el sensor de Efecto Hall.

- I2C/GPIO: Configurados para la comunicación con el display LCD y para la lectura de las pulsaciones del teclado matricial, respectivamente.

2.3.3. Algoritmo de Operación

El algoritmo de operación sigue el siguiente flujo de trabajo:

1. Inicialización: Configuración de todos los periféricos (I2C, Timers, PWM) a nivel de registro.
2. Configuración: El usuario introduce los parámetros de Tiempo y Velocidad (en RPM) mediante el teclado matricial.
3. Ejecución: El microcontrolador inicia el proceso:
 - Envía la señal PWM correspondiente al ESC.
 - Inicia el conteo del Timer para el tiempo total.
 - Monitoriza y muestra las RPM reales mediante el sensor de Efecto Hall.
4. Finalización/Paro: El proceso termina al agotarse el tiempo o al presionar el botón de paro de emergencia, momento en el cual la señal PWM cesa y se detiene el motor.

2.4. Proceso de Validación

El proceso de validación inicial del sistema se centró en la caracterización funcional del equipo antes de las pruebas químicas:

- Calibración de Velocidad: La lectura de RPM se realiza y se visualiza en tiempo real en el display LCD, obtenida directamente a partir del sensor de Efecto Hall. Esto permite una calibración precisa del valor del ciclo de trabajo (Duty Cycle) del PWM necesario para alcanzar una velocidad objetivo.
- Pruebas de Recubrimiento: Las pruebas de recubrimiento con líquidos reales se realizarán en una etapa posterior para evaluar la uniformidad y el espesor de las películas depositadas sobre sustratos de vidrio.

3. Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño, la construcción y la caracterización funcional de un prototipo de máquina de recubrimiento por centrifugación (spin coater) de bajo costo y código abierto. El desarrollo de este equipo aborda directamente la barrera económica impuesta por los equipos comerciales, poniendo una herramienta esencial para la investigación de películas delgadas al alcance de laboratorios con recursos limitados.

Los puntos clave y hallazgos del desarrollo son:

- Eficiencia de Hardware y Software: La arquitectura basada en el microcontrolador STM32F401RE y el

ESC BLDC demostró ser robusta y eficiente. La implementación del firmware a nivel de registros (Bare Metal) maximizó la velocidad de procesamiento, permitiendo un control de motor preciso y de baja latencia.

- Diseño Robusto y Replicable: El uso de la impresión 3D con ABS no solo minimizó los costos, sino que también garantiza la replicabilidad del chasis. La integración del motor brushless A2212, junto con un sensor de Efecto Hall, estableció un sistema de lazo cerrado capaz de mantener velocidades estables, un requisito fundamental para la uniformidad de las películas.
- Propuesta de Valor: Al integrar componentes comerciales de bajo costo y una plataforma de control de alto rendimiento, este prototipo ofrece una alternativa viable y accesible a la instrumentación especializada, cumpliendo con la promesa de la investigación económica.

A pesar de los resultados funcionales satisfactorios, el trabajo sugiere las siguientes líneas de investigación futuras:

- Validación Química: Se requiere realizar pruebas de recubrimiento con soluciones estandarizadas para obtener datos de caracterización de la uniformidad y el espesor de la película (mediante microscopía o perfilometría), lo cual validará el equipo en aplicaciones reales de materiales.
- Mejoras en el Control: Implementar un control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) avanzado para optimizar la curva de aceleración y minimizar el sobreimpulso, logrando una estabilidad de RPM aún más rápida.
- Funcionalidad Adicional: Explorar la adición de un sistema de succión por vacío para el chuck de muestra, lo que mejoraría significativamente la adherencia del sustrato a altas velocidades.

Referencias

- Abdelghani, L., Said, L., Said, B., & Okba, B. (2022). Spin coating method deposited nickel oxide thin films with various film thicknesses. *Journal of Chemical Research*, pp. 1–5. DOI: 10.1177/17475198211066535.
- Adiba, A., Mayanglambam, F., & Ahmad, T. (2025). Protocol for fabricating optically transparent, pinhole-free NiO thin film for memory devices using the spin-coating technique. *STAR Protocols*, 6, 103732.
- Ali, F. H. (2020). Building a spin coater device for thin-film preparation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 757, 012050. doi:10.1088/1757-899X/757/1/012050.
- Butt, M. A. (2022). Thin-Film Coating Methods: A Successful Marriage of High-Quality and Cost-Effectiveness—A Brief Exploration. *Coatings*, 12(8), 1115. https://doi.org/10.3390/coatings12081115.
- Carbonell Rubio, D., Weber, W., & Klotzsch, E. (2022). Maasi: A 3D printed spin coater with touchscreen. *HardwareX*, 11, e00316. https://doi.org/10.1016/j.hx.2022.e00316.
- Chang, R. C., Chen, F. Y., & Yang, P. H. (2007). Dynamic mechanical properties of photo resist thin films. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 21(10), 1739–1745. DOI: 10.1007/BF03177403.

- Hameed, A. S., Madlool, R. A., Ridha, N. J., Hussein, B. M., Alosfur, F. K. M., & Tahir, K. J. (2022). Fabrication of Spin Coater Device using Hematocrit Centrifuge with Vacuum Substrate Holder for Thin Film Deposition. *Materials Research*. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0496>.
- McIntyre, F., Sellier, M., Gooch, S., & Nock, V. (2024). Film thickness characterization in dual-axis spin coating of a sphere. *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 233, 1637–1651. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-024-01153-y>.
- Mustafa, H. A., & Jameel, D. A. (2021). Modeling and the main stages of spin coating process: A review. *JOURNAL OF APPLIED SCIENCE AND TECHNOLOGY TRENDS*, 2(2), 119–123. doi: 10.38094/jastt203109.
- Shamsuddin, L., MdIzah, S. S., & Mohamed, K. (2014). Comparative Study of PMMA 120K and 996K for Electron Beam Lithography Application. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(15), 55–58.
- Shen, D., Jin, Y., Zhang, Z., Song, R., Liu, M., Li, W., ... Duan, X. (2024). Recent Advances in Spin-coating Precursor Mediated Chemical Vapor Deposition of Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides. *Precis. Chem.*, 2, 282–299.
- Shnier, A., Otieno, F., Billing, C., Wamwangi, D., & Billing, D. G. (2023). Robust Arduino controlled spin coater using a novel and simple gravity chuck design. *HardwareX*, 14, e00422. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00422>.
- Teixeira, E. S., Cavalcanti, R. C., Nunes, V. F., Maia Júnior, P. H. F., Lima, F. M., Pinho, D. C., ... Freire, F. N. A. (2021). Building and Testing a Spin Coater for the Deposition of Thin Films on DSSCs. *Mater Res.*, 23(6), e20200214. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0214>.