

## Control no Lineal Robusto de una Máquina para Fabricación de Películas Delgadas.

Héctor Huerta<sup>a\*</sup>, René Osorio<sup>a</sup>, Nimrod Vázquez<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Valles, Carretera Guadalajara - Ameca Km. 45.5, C. P. 46600, Ameca, Jalisco, México.

<sup>b</sup> Instituto Tecnológico de Celaya, Departamento de Electrónica, Antonio García Cubas S/N, C: P: 38010, Celaya, Guanajuato, México.

### Resumen

En este artículo se presenta un esquema de control para una máquina utilizada para fabricación de películas delgadas, con un motor de corriente directa sin escobillas, basada en el método de centrifugación. Se incluye el modelo no lineal del motor sin escobillas, que corresponde a una máquina síncrona trifásica, con los flujos del rotor y las corrientes en el estator, como las dinámicas eléctricas, además de la velocidad en el rotor, como la dinámica mecánica. El objetivo de control es la regulación de la velocidad del rotor. Se utilizó la técnica de control por bloques y así obtener una variedad deslizante. Se eligió la técnica de control por modos deslizantes para garantizar que la variedad elegida sea atractiva y obtener robustez en lazo cerrado. Para completar el esquema de control se incluye un observador para estimar los estados no medibles, en este caso, los flujos del rotor. Se implementó el esquema de control propuesto en la máquina para fabricación de películas delgadas, además de un controlador basado en un PID con ganancias programadas, lo anterior para realizar la comparación de ambas técnicas. El esquema de control por modos deslizantes propuesto presenta ventajas sobre el controlador PID, ya que se obtiene la regulación de la velocidad del rotor, sin error en estado estacionario, considerando variaciones paramétricas.

### Palabras Clave:

Modos deslizantes, Sistema no lineal, Motor sin escobillas, Controlador PID.

### 1. Introducción

Una de las principales técnicas para la obtención de películas delgadas es el método de centrifugación o spin-coating, utilizado para depositar soluciones en sustratos planos, en general, hechos de vidrio. El procedimiento consta de cuatro partes: 1) depósito, 2) aceleración, 3) velocidad constante, y 4) evaporación. En la etapa de depósito, una cantidad determinada de una solución, compuesta de un material mezclado con solvente en una proporción conocida, se vierte en el centro del sustrato. De acuerdo a las necesidades del usuario, el sustrato puede tener diferentes dimensiones; se coloca en el centro de una base giratoria y se sujeta mediante algún adhesivo o una bomba de vacío, siendo el segundo método el más utilizado por su practicidad y seguridad (Tyona, 2013).

En la etapa de depósito, el sustrato puede estar en reposo o girando con baja velocidad, típicamente 500 RPM. En la segunda etapa, aceleración, se incrementa la velocidad angular del sustrato hasta alcanzar la velocidad requerida. Una vez que se alcanza la velocidad requerida, inicia la etapa de velocidad constante, el usuario selecciona su duración. La velocidad angular puede alcanzar hasta las 10,000 RPM y debe ser controlada con alta precisión, sin variaciones, para lograr la uniformidad y calidad adecuada en la película y garantizar repetitividad en los resultados.

Se pueden requerir varias etapas de aceleración y velocidad constante. La evaporación ocurre durante todo el proceso y se puede utilizar tratamiento térmico para retirar el exceso de solvente. Entonces, la máquina para spin coating, llamado spin-coater, debe tener la flexibilidad para poder programar varias etapas de aceleración y velocidad constante con diferentes periodos de tiempo en cada una de ellas y con gran precisión. Además, se debe tener un amplio rango de operación en la velocidad angular, hasta llegar a las 10,000 RPM. Finalmente, se debe poder colocar una gran variedad de sustratos, de diferentes dimensiones, de forma segura (Tyona, 2013).

En (Fardousi *et al.*, 2013) se presentó un spin-coater de bajo costo con un motor de CD con escobillas. Sin embargo, el uso de este tipo de motores tiene algunas desventajas y no se pueden lograr algunas películas debido al reducido rango de operación en la velocidad. Además, el número de etapas de aceleración y velocidad constante se limita a uno y el controlador opera en lazo abierto. En (Hossain y Paul, 2014), se presentó un controlador PID en lazo cerrado para spin-coater pero el rango de operación es limitado debido al uso del motor de CD con escobillas nuevamente. También se han utilizado motores de CA, pero el rango de velocidad es limitado, (Sevvanthi *et al.*, 2012).

Para evitar las desventajas del motor de CD con escobillas, en (Bianchi *et al.*, 2006; Manikandan, 2015) se utilizó el motor de CD sin escobillas (Brushless DC o BLDC), en una máquina spin-coater con controladores lineales clásicos. Sin embargo, la región de operación completa del BLDC es no lineal. Aunque los controladores lineales han demostrado su eficacia, la aplicación de

\* Autor en correspondencia.

Correo electrónico: hector.huerta@profesores.valles.udg.mx,  
URL: www.cuvalles.udg.mx

estos en regiones grandes pudieran dejar de garantizar estabilidad en lazo cerrado y una operación adecuada, debido a que el controlador se ajusta alrededor de un punto de equilibrio específico (Khalil, 1996). Además, las máquinas spin-coater con motores BLDC presentadas hasta ahora, se limitan a una etapa de aceleración y una de velocidad constante, lo cual reduce la flexibilidad de la máquina.

Aunque los controladores lineales clásicos, por ejemplo el PID, han demostrado su efectividad en máquinas eléctricas, su diseño se limita a un punto de operación, por lo que se pueden implementar algunas estrategias para evitar esta desventaja (Calvini *et al.*, 2015; Tepljakov *et al.*, 2016). Se puede dividir la región no lineal de operación del BLDC en una familia de subespacios lineales. Con esto se puede diseñar una familia de controladores no lineales, lo que se conoce como ganancias programadas (gain-scheduling) (Khalil, 1996). Esta técnica ha demostrado su efectividad en sistemas electromecánicos (Béjar y Ollero, 2008; Moriano y Naranjo, 2012) y en motores de corriente directa (Matausek *et al.*, 1996; Kukolj *et al.*, 1999).

Por otro lado, se sabe que la técnica de control por modos deslizantes ofrece robustez ante variaciones paramétricas y perturbaciones externas. Esta metodología se puede aplicar a sistemas lineales y no lineales. Se puede diseñar una variedad deslizante no lineal para el BLDC. Se han utilizado controladores por modos deslizantes con desempeño satisfactorio en sistemas mecánicos (Prieto *et al.*, 2015), electromecánicos (Niño-Suárez *et al.*, 2007; Moriano y Naranjo, 2012; Raygosa-Barahona *et al.*, 2015; Dursun y Durdu 2016; Ortigoza *et al.*, 2016; Xia *et al.*, 2016) y electrónicos (Silva-Ortigoza *et al.*, 2008; Silva-Ortigoza *et al.*, 2015; Sánchez *et al.*, 2016). En el caso de control de motores, cuando se utilizan controladores por modos deslizantes, en general, se requiere el uso de observadores de estado, para estimar los estados no medibles (Yao *et al.*, 2014).

En este artículo, se presenta el diseño de una máquina tipo spin-coater para fabricación de películas delgadas. Se muestra la parte mecánica, compuesta de una base para un motor BLDC, una base para sujetar los sustratos con tamaño desde 1 hasta 5 pulgadas, una cubierta protectora, un brazo para sujetar un dispositivo para suministrar la solución al sustrato y una carcasa para instalar todos los componentes. Los sustratos se sujetan a la base mediante un sistema con una bomba de vacío. Se incluye el convertidor de potencia para alimentar los devanados del motor BLDC, un sistema embebido para implementar el esquema de control propuesto y un PID con ganancias programadas para comparar ambos controladores, así como una interfaz electrónica para el usuario. Se pueden seleccionar el número de etapas de aceleración y velocidad constante, así como la duración de estas. La principal aportación del artículo es el desarrollo e implementación de un algoritmo de control no lineal robusto, utilizando la técnica de control por modos deslizantes. La variedad deslizante se diseña tomando en cuenta el modelo completo del motor BLDC, considerando las dinámicas del estator y del rotor. Dado que la ley de control depende de los flujos en el rotor, mismos que no se pueden medir, se presenta un observador de estados, para estimarlos y complementar el esquema de control. Con el objetivo de mostrar las ventajas del controlador por modos deslizantes, se desarrolló un controlador lineal clásico, basado en una familia de controladores tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) parametrizados con una familia de subespacios lineales que conforman la región de operación del motor BLDC, con ganancias programadas. Ambos controladores se implementaron en un sistema embebido basado en un microrcontrolador de 32 bits con arquitectura ARM (Advanced

RISC Machine), logrando una región de operación desde 500 RPM hasta 10,000 RPM, como se requiere en la fabricación de películas delgadas.

El resto del artículo está organizado como sigue. La sección 2 muestra el desarrollo de la máquina tipo spin-coater, para fabricación de películas delgadas. En la sección 3 se presenta el esquema de control con un controlador PID con ganancias programadas. En la sección 4 se desarrolla el esquema de control por modos deslizantes. En la sección 5 se encuentran los resultados experimentales del spin-coater, incluyendo una figura que muestra una película delgada. Finalmente, la sección 6 presenta las conclusiones.

## 2. Spin-coater.

La máquina para fabricación de películas delgadas tipo spin-coater propuesta consiste en la etapa mecánica, etapa electrónica y el desarrollo e implementación del esquema de control propuesto. En esta sección se describen las partes mecánica y electrónica, mientras que en la sección 3, se muestran un controlador tipo PID con ganancias programadas. En la sección 4, se incluye el esquema de control por modos deslizantes propuesto, para después mostrar la comparación de los dos controladores.

### 2.1. Etapa mecánica

La parte mecánica de la máquina comprende la estructura de montaje del motor BLDC, la base rotatoria para sustratos, la carcasa para los componentes y la tapa protectora. La base para el motor BLDC se fabricó en aluminio 6061, debido a sus propiedades mecánicas y disponibilidad. La base para sustratos tiene cinco ranuras con forma circular, concéntricas, con diámetros desde 1 hasta 5 pulgadas y se fabricó con aluminio 6061. Se eligió este material por su baja densidad, lo que permite reducir el par mecánico requerido en el motor BLDC. Para lograr sujetar sustratos con diferentes formas y tamaños se incluyeron las cinco ranuras. El sustrato a colocar debe cubrir completamente la circunferencia apropiada, donde se coloca un sello mecánico circular de hule, para permitir la sujeción mediante una bomba de vacío y evitar fugas en el proceso. En la Figura 1 se puede ver el soporte para motor ensamblado, con la base para sustratos colocada.

Tomando en cuenta las características mecánicas del sistema, se seleccionó el actuador rotatorio, en este caso un motor tipo BLDC. Con base en la velocidad angular y la aceleración angular requeridas, así como la constante de inercia, se calcularon los parámetros necesarios para el motor, es decir:

$$T_m = 48 \times 10^{-3} \text{ Nm},$$

$$P = 50.27 \text{ W}$$

donde  $T_m$  es el par mecánico y  $P$  es la potencia requerida a 10,000 RPM. El actuador seleccionado es un motor trifásico Maxon BLDC 449464, sus parámetros se incluyen en la Tabla 1.

### 2.2. Etapa electrónica

La etapa electrónica comprende la parte de potencia y la parte de control. Para la etapa de potencia se tiene que considerar que un motor tipo BLDC es una máquina síncrona trifásica con un rotor de imanes permanentes. De esta manera, se tienen campos magnéticos rotatorios con magnitud fija y el control del motor se lleva a cabo a través de los devanados del estator (Krause *et al.*,

Download English Version:

<https://daneshyari.com/en/article/8050510>

Download Persian Version:

<https://daneshyari.com/article/8050510>

[Daneshyari.com](https://daneshyari.com)