

Automatización de un prototipo Tape Casting para elaborar compósitos polimérico; perspectiva de industria 4.0 Automation of a Tape Casting prototype for the production of polymeric composites: a perspective of industry 4.0

N. de Jesús-Pantaleón ^a, G. García-Domínguez ^a, L. G. Chávez-Escalante ^a, J. Reyes-Miranda ^b, A. Garrido-Hernández ^{b*}

^a Universidad Tecnológica de Tecámac. Carretera Federal México-Pachuca Km. 37.5 Predio Sierra Hermosa, Tecámac, Estado de México. C.P. 55740. México.

^b Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Departamento de Materiales, Av. San Pablo No.420 Col. Nueva el Rosario C.P. 02128, Alcaldía Azcapotzalco, CDMX.

Resumen

El Tape Casting es una técnica clave para la incorporación de nanomateriales, utilizada principalmente en la producción de películas cerámicas y poliméricas con una distribución uniforme del material. En este estudio, se automatizó e incorporó elementos de industria 4.0 a un prototipo de Tape Casting de bajo costo. La preparación inicial se centró en las partes móviles y fijas, garantizando su óptimo funcionamiento a través de un proceso de inspección, rectificación y limpieza de componentes. El sistema de control fue implementado utilizando un motorreductor de 12V DC, regulado por un Arduino Nano que gestionó la velocidad y dirección del aplicador mediante una señal de modulación por ancho de pulso (PWM). Para mejorar la precisión y seguridad, se integraron limit switches y se habilitó un control remoto radiofrecuencia y una APP que se comunica vía bluetooth con un celular. La validación del sistema se realizó a través de la medición precisa del recorrido de la cuchilla en función del tiempo, obteniendo una ecuación que describe la relación entre las vueltas del potenciómetro y la velocidad del aplicador. Los resultados mostraron un alto coeficiente de correlación ($R^2=0.9774$), con la velocidad y el número de vuelta del potenciómetro lo que indica una buena reproducibilidad del proceso. Este prototipo permitió obtener películas poliméricas de PVA con un control en la velocidad de aplicación y un espesor homogéneo. La integración de control remoto y monitoreo en tiempo real con tecnologías como Bluetooth y radiofrecuencia, hacen que el sistema de Tape Casting sea adaptable y eficiente, alineándose con los principios de la Industria 4.0.

Palabras Clave:

Tape Casting, películas poliméricas, automatización, control de velocidad.

Abstract

Tape Casting is a key technique for incorporating nanomaterials, mainly used in producing ceramic and polymer films with a uniform material distribution. In this study, a low-cost Tape Casting prototype was automated and incorporated with Industry 4.0 elements. The initial preparation focused on the moving and fixed parts, ensuring their optimal functionality through a process of inspection, rectification, and component cleaning. The control system was implemented using a 12V DC gear motor, regulated by an Arduino Nano that managed the speed and direction of the applicator through a pulse-width modulation (PWM) signal. To improve precision and safety, limit switches were integrated, and a remote control was enabled through radio frequency along with an app that communicates via Bluetooth with a mobile phone. System validation was carried out by precisely measuring the blade's travel over time, obtaining an equation that describes the relationship between potentiometer turns and the applicator's speed. The results showed a high correlation coefficient ($R^2=0.9774$) between speed and potentiometer turns, indicating good process reproducibility. This prototype enabled the production of PVA polymer films with controlled application speed and uniform thickness. The integration of remote control and real-time monitoring with technologies like Bluetooth and radio frequency makes the Tape Casting system adaptable and efficient, aligning with Industry 4.0 principles.

Keywords: Tape casting, polymeric films, automation, speed control.

*Autor para la correspondencia: agh@azc.uam.mx

Correo electrónico: ndejesusp@utecamac.edu.mx (N. de Jesús-Pantaleón), garciaiovanni1311@gmail.com (G. García-Domínguez), ichaveze@utecamac.edu.mx (L. G. Chávez-Escalante), joremi@azc.uam.mx (J. Reyes Miranda), agh@azc.uam.mx (Aristeo Garrido-Hernández).

1. Introducción

La automatización de procesos industriales ha sido un motor clave en la mejora de la eficiencia y la precisión en la producción de bienes y materiales avanzados (Campilho, et al., 2016, Domínguez, et al., 2021). En particular, la automatización de máquinas utilizadas en la manufactura de películas y recubrimientos poliméricos ha permitido un control riguroso de las variables de proceso, como la velocidad y la uniformidad de los recubrimientos. Uno de los procesos más utilizados para la producción de películas poliméricas y cerámicas es el Tape Casting, una técnica esencial en la incorporación de materiales. (Jabbari, et al., 2016). Este proceso se originó en la década de 1940, desarrollado inicialmente para la producción de cintas cerámicas en la industria electrónica, permitiendo la creación de capas delgadas y uniformes de materiales cerámicos sobre una superficie plana (Minoo et al., 2016, Hotza et al., 2019).

Con el tiempo, el Tape Casting se ha diversificado y hoy en día se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la fabricación de componentes electrónicos, biocerámicas, baterías, y películas poliméricas luminiscentes (Saleh et al., 2020).

Esta técnica ha sido fundamental para el avance en la producción de dispositivos electrónicos avanzados y materiales para aplicaciones biomédicas (Jabbari et al., 2016; Zhou et al., 2016). El Tape Casting es un proceso de fabricación que permite la deposición controlada de suspensiones de polímeros sobre un sustrato en movimiento, formando una película delgada al secarse (Hotza et al., 2019; Trunec et al., 2019; Zhou et al., 2012). La calidad del recubrimiento final depende en gran medida de la velocidad de desplazamiento de la máquina y del flujo de la suspensión aplicada, variables que deben ser controladas con precisión para evitar defectos como variaciones en el espesor o la aparición de burbujas (da Silva et al., 2020; Lee et al., 2023). El avance de la automatización en este contexto ha permitido integrar sistemas de control basados en microcontroladores, como Arduino, para ajustar y monitorear continuamente las variables críticas del proceso (Ji et al., 2023; Jonson et al., 2021).

Existen varias razones para fabricar máquinas Tape Casting de bajo costo para atender las necesidades académicas. Su accesibilidad a tecnologías avanzadas, que de otro modo estarían fuera del alcance financiero de muchas instituciones, permite a los investigadores trabajar con herramientas de alta precisión. La fabricación local de estas máquinas también ofrece una personalización significativa para satisfacer necesidades específicas de investigación, lo cual es crucial para la experimentación y el desarrollo de nuevos materiales, ya que permite ajustar las máquinas según los requisitos de cada proyecto. Además, contar con este tipo de equipos en entornos educativos proporciona a estudiantes y académicos la oportunidad de adquirir habilidades prácticas en la fabricación y manipulación de materiales, enriqueciendo su formación académica y preparándolos para futuras investigaciones o carreras en la industria.

Los avances en tecnología y el acceso a componentes electrónicos económicos, como microcontroladores (por ejemplo, Arduino) y motorreductores, han reducido significativamente los costos de construcción de equipos de precisión. Además, la disponibilidad de software de código abierto y recursos en línea facilita el diseño y la programación de sistemas de control, eliminando la dependencia de soluciones propietarias caras.

Asimismo, la proliferación de plataformas de prototipado rápido, como impresoras 3D y fresadoras CNC, permite la creación de piezas personalizadas a bajo costo, esenciales para el montaje de equipos de Tape Casting.

Algunos ejemplos de la fabricación de prototipos a bajo costo son; Serrano-Pérez et al. (2023) desarrollaron un prototipo de máquina Dip-Coater revolver utilizando materiales reciclados y componentes accesibles, como Arduino, para implementar un sistema de control PID. Este enfoque permitió reducir costos y mejorar la precisión en la producción de recubrimientos homogéneos, haciendo la tecnología más accesible y adaptable a diversas necesidades industriales y de investigación.

Ayturan et al. (2019) diseñaron y construyeron una máquina Dip-Coater casera utilizando materiales reciclados y componentes de bajo costo. Al emplear un microcontrolador básico y elementos disponibles en el mercado, lograron crear una máquina funcional para la producción de películas delgadas a un costo significativamente menor que las opciones comerciales. Castillo-Vilcatoma et al. (2021) fabricaron una máquina Dip-Coater de bajo costo para la producción rápida de películas delgadas uniformes. Utilizaron materiales accesibles y técnicas de diseño eficientes para reducir costos sin sacrificar la calidad del recubrimiento, lo que permite que una tecnología más accesible para laboratorios de investigación con recursos limitados. Esto respalda la viabilidad del prototipo de Tape Casting de desarrollar equipos avanzados con un presupuesto limitado, accesible y replicable para otras instituciones o investigadores interesados en explorar y expandir esta tecnología. Hoy en día, gracias al desarrollo de la tecnología, es posible incorporar elementos como la conectividad y la posibilidad de ser controlados remotamente, ya sea mediante Bluetooth o con el celular, dispositivo indispensable en las tareas diarias. Esto forma parte de la Industria 4.0, caracterizada por la integración de tecnologías que permiten la automatización, la conectividad y la inteligencia operativa. Como señalan Hermann, Pentek, & Otto (2016), los sistemas de Industria 4.0 no sólo se basan en el empleo de nuevas tecnologías sino en la reconfiguración de tecnologías accesibles para maximizar la eficiencia, la adaptabilidad y la respuesta en tiempo real. En el contexto de la Industria 4.0, la digitalización y conectividad de procesos son esenciales para lograr una mayor eficiencia y flexibilidad operativa. (Javaid et al., 2022).

En este trabajo, se presenta un enfoque integral para la automatización de una máquina de Tape Casting con elementos de Industria 4.0, controlando la velocidad de la cuchilla mediante una aplicación móvil y un controlador Arduino a través de comunicación Bluetooth, y con la operación usando un APP desde un teléfono celular.

2. Metodología

2.1. Preparación de las partes móviles y fijas para el control de velocidad.

El prototipo de Tape Casting que se automatizó fue construido por el ingeniero Roberto Rosales García durante el desarrollo de la tesis “*Síntesis de películas poliméricas fotoluminiscentes dopadas con complejos mononucleares Eu-ácido benzoico*” (Rosales García, R. 2022), donde lo empleó como soporte para la fabricación de películas poliméricas.

Dado que el diseño ya estaba establecido, el primer reto fue la preparación de las partes móviles. Para ello, se revisaron los componentes para asegurar un funcionamiento óptimo en la producción de películas. Se realizó un proceso de inspección y rectificación de las piezas de la máquina de Tape Casting.

Utilizando indicadores de carátula digital, se midieron las vibraciones y desviaciones en los componentes mecánicos para garantizar la estabilidad durante la operación. Las piezas fuera de las tolerancias especificadas fueron rectificadas. Además, se desensamblaron y limpiaron los componentes móviles, eliminando cualquier residuo que pudiera causar fricción o irregularidades en el movimiento.

2.2. Sistemas de Automatización y Control / Instalación del sistema de control y sensores.

Se identificó la variable que debería controlarse y se realizó la implementación del sistema móvil, incluyendo un motorreductor de 12V DC, controlado mediante un driver L293D. El control de velocidad se realizó utilizando una señal de modulación por ancho de pulso (PWM) generada por un Arduino Nano. Esto permitió ajustar la velocidad en tiempo real a través de un potenciómetro de 10k Ω , ofreciendo al usuario la capacidad de calibrar finamente la velocidad según sea necesario. Además, se incorporan botones físicos en la interfaz del dispositivo que permiten seleccionar entre tres niveles de velocidad preestablecidos. Estos ajustes predefinidos facilitan la operación rápida y la adaptabilidad a diferentes condiciones operativas sin necesidad de ajustes manuales continuos.

El sentido de giro del motor se reguló invirtiendo la polaridad de la alimentación a través del driver, controlado mediante botones físicos y un sistema remoto. Esto facilita una operación precisa del aplicador y permite a los usuarios cambiar la dirección de manera intuitiva y eficiente. La configuración actual del sistema también incluye una pantalla LCD que muestra el nivel de velocidad seleccionado, proporcionando una interfaz clara y accesible para el usuario, lo que mejora la experiencia de uso y asegura que los ajustes sean visibles y fácilmente modificables en cualquier momento.

Se integraron dos limit switches (Figura 1) en los extremos del recorrido del aplicador, conectados a los pines digitales del Arduino. Estos switches proporcionaron retroalimentación directa al sistema, deteniendo o invirtiendo el movimiento cuando el aplicador alcanzaba los límites del recorrido, garantizando precisión y seguridad en el proceso.

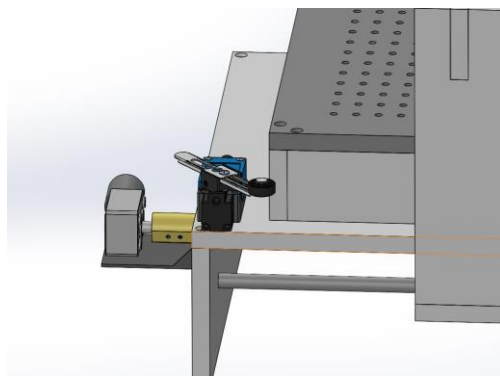


Figura 1: Limit switches usados en inicio y fin de carrera.

Para la conectividad se eligió un módulo Bluetooth y un módulo de radiofrecuencia que permitieron la interacción remota a través de dispositivos móviles, facilitando la selección de velocidad y dirección sin intervención física directa. Además, el sistema incluyó una bomba de vacío controlada por el Arduino, y un botón de parada de emergencia que proporcionó una capa adicional de seguridad.

2.3. Funcionamiento del Tape Casting para elaborar películas poliméricas

Se realizó una caracterización experimental en la máquina Tape Casting, enfocado en la producción de recubrimientos. Esta caracterización se centró en analizar las vueltas del potenciómetro y el tiempo promedio requerido para completar una sección de trabajo, con el objetivo de entender la dinámica del proceso y su impacto en la calidad del producto final. Para ello, se realizaron mediciones por sectores donde el área de trabajo del Tape Casting se dividió en tres sectores iguales, y se registraron los tiempos de recorrido de la cuchilla de ida y regreso en cada sector.

La metodología para la elaboración de películas poliméricas multifuncionales utilizando el prototipo Tape Casting automatizada de bajo costo se describe en la Figura 2. En el proceso se describe la preparación de la solución polimérica hasta la aplicación del recubrimiento y el secado del material.

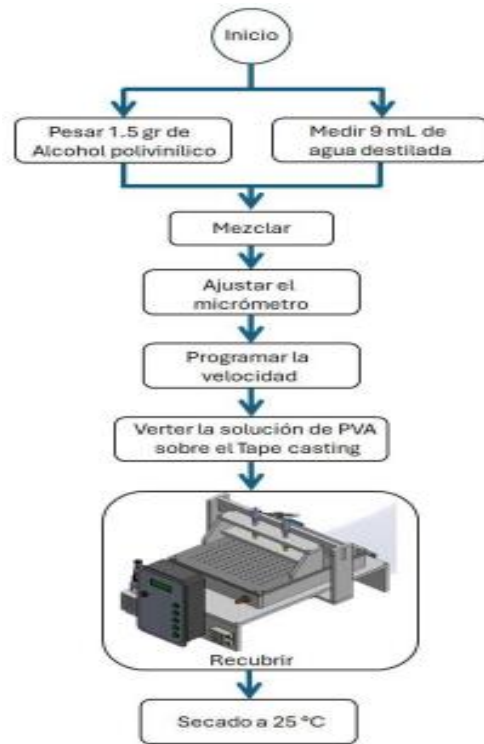


Figura 2: Esquema general de la metodología para fabricación de recubrimientos de PVA.

Para evaluar la homogeneidad del espesor, se realizaron mediciones con un calibrador digital marca Ultratech con precisión: $\pm 0.0005''$ en cuatro puntos diferentes (como se muestra en la Figura 3) de recubrimientos con espesores de 0.5, 1, 1.5 y 2 milímetros. Cada una de las muestras fue medida por triplicado para garantizar la precisión de los resultados.

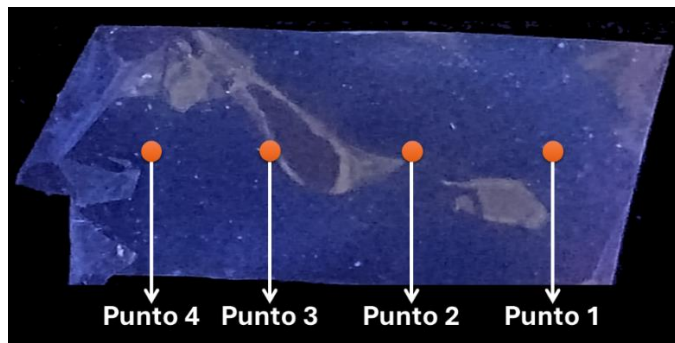


Figura 3: Representación de las medidas realizadas al espesor de la película de PVA.

3. Resultados

3.1. Componente de la máquina Tape Casting y resultados de la rectificación

Durante el proceso de rectificación, las piezas metálicas, como la base de aluminio fueron mecanizadas utilizando técnicas de fresado y torneado CNC. Estas técnicas aseguraron que las superficies de las piezas y superficies lisas garantizaran un ensamblaje preciso, se redujo el desgaste, se mejoró el ensamblaje, y se minimizó las vibraciones de 15 milímetros a

2 milímetros, lo que permitirá un funcionamiento más eficiente y estable.

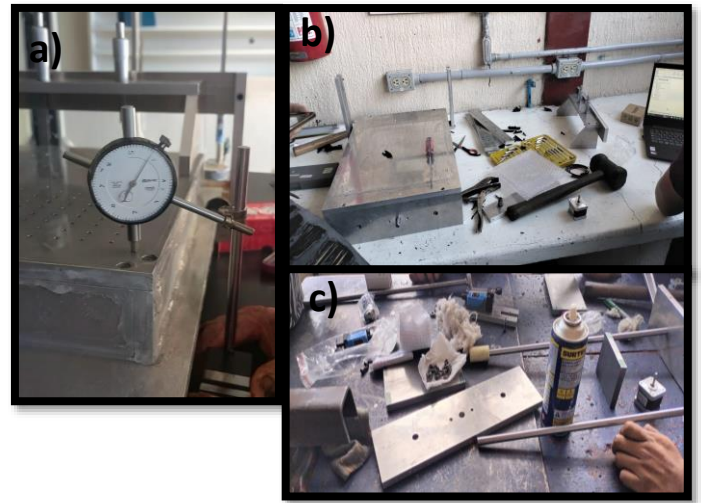


Figura 4: a) rectificación con indicador de carátula, b) desensamble de piezas móviles, c) limpieza de componentes.

El ensamblaje del equipo (Figura 5) se realizó utilizando un enfoque modular, ensamblando los: a) componentes individuales por separado antes de integrarlos en la estructura principal. Este enfoque modular permite un montaje más rápido y facilita la sustitución de piezas en caso de fallos y facilita el mantenimiento. Esta elección de diseño permite realizar ajustes y reparaciones sin necesidad de herramientas especializadas, reduciendo además el tiempo de ensamblaje y los costos asociados. Posteriormente, se elaboraron: b) planos detallados en SolidWorks de los componentes para documentar las modificaciones y proporcionar una guía para futuras intervenciones, asegurando la correcta reconfiguración.

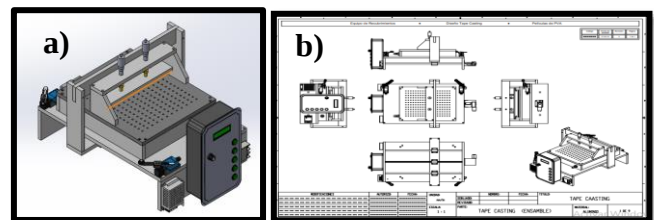


Figura 5: a) Ensamblaje de piezas para máquina Tape Casting, b) planos de máquina Tape Casting.

3.2. Automatización, Control y componentes del Tape casting

En la Tabla 1 se enlistan los componentes mecánicos, electrónicos que son parte esencial del control automático, además se muestran las características principales de los componentes que conforman la máquina Tape Casting que ayudará a entender mejor cómo contribuyen al funcionamiento general y la eficiencia del proceso.

Tabla 1: Componentes de máquina Tape Casting.

Componente	Material	Características
Base de la máquina	Aluminio	Dimensiones: 500 mm x 300 mm x 20 mm
		Peso: 3 kg
		Conductividad térmica: 205 W/m·K
		Rigidez mecánica: Alta.
Micrómetros	Acero inoxidable	Precisión de ajuste: ± 0.01 mm
		Rango de medición: 0-25 mm
		Resistencia a la corrosión: Alta
		Resistencia mecánica: Alta.
Limit Switch (Interruptor de límite)	Plástico de alta resistencia	Tipo de contacto: Normalmente abierto (NA)
		Voltaje de operación: 12 VDC
		Corriente nominal: 5 A
		Respuesta de activación: <1 ms
Doctor Blade (Cuchilla Dosificadora)	Acero inoxidable	Dimensiones: 100 mm de ancho, 0.5 mm de grosor
		Resistencia a la corrosión: Alta
		Dureza: Rockwell C 60
		Ajuste de ángulo: Variable (0-5°)
Motor Nema 23	Aluminio	Dimensiones: 57 x 57 mm
		Ángulo de Paso: 1.8 grados por paso (200 pasos por revolución).
		Corriente 4.2 A/fase
		Par de torsión: 0.6 a 3.0 Nm
Perilla de control y Tablero de control	Plástico ABS	Voltaje: 8-48V
		Control de velocidad: 0-100 RPM
		Alimentación: 5 VDC
		Consumo de corriente: 100 mA
Control Remoto y Aplicación Móvil	Plástico ABS (control remoto) y software (aplicación móvil)	Interface: Digital y analógica
		Frecuencia de operación del control remoto: 2.4 GHz
		Rango de operación: 30 m
		Compatibilidad de la aplicación: iOS y Android

La Figura 6 muestra la base de la máquina, que está fabricada en aluminio, con dimensiones de 500 mm x 300 mm x 20 mm y un peso de 3 kg. El aluminio fue seleccionado por su alta conductividad térmica (205 W/m·K), lo que facilita la disipación del calor generado durante el proceso de Tape Casting. Además, presenta alta rigidez mecánica, lo que proporciona la estabilidad necesaria para minimizar las vibraciones que puedan afectar la precisión de las capas aplicadas. Los micrómetros utilizados en el sistema están fabricados en acero inoxidable, con una precisión de ajuste de ± 0.01 mm, lo que permite controlar con exactitud el espesor de las capas de los compósitos poliméricos. Los resultados reflejan una alta precisión y consistencia en la producción de películas, logradas gracias al diseño, materiales y tecnologías de automatización que características de la Industria 4.0.

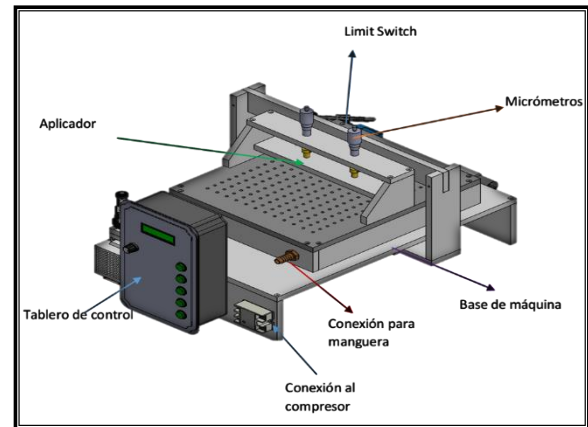


Figura 6: Elementos de la máquina Tape Casting.

El circuito electrónico implementado en la máquina de Tape Casting fue diseñado para proporcionar un control automatizado, preciso y eficiente del motorreductor de 12V DC, responsable de mover el aplicador (cuchilla) a lo largo del sistema. La estructura de control central se basa en un Arduino Nano, que actúa como el controlador principal, gestionando tanto las entradas como las salidas necesarias para la operación de la máquina.

El motorreductor está controlado a través de un driver L293D, el cual permite regular la velocidad mediante una señal de modulación por ancho de pulso (PWM) generada por el Arduino en el pin digital 10. La velocidad del motor se selecciona en tres modos: alta, baja y proporcional a la señal de un potenciómetro de 10k Ω , conectado al pin analógico A0 del Arduino. El ajuste de la velocidad proporcional se realiza en tiempo real según el valor leído por el potenciómetro. El sentido de giro del motor se controla invirtiendo la polaridad de la alimentación en los pines 11 y 14 del L293D, lo que permite alternar entre rotación horaria y antihoraria. Este cambio se activa mediante botones físicos conectados a los pines digitales 2 y 3 del Arduino. El circuito también incluye dos limit switches, colocados estratégicamente al inicio y al final del recorrido del aplicador. Estos switches están conectados a los pines digitales 7 y 8 del Arduino y proporcionan retroalimentación directa, permitiendo detener o invertir el movimiento del motor una vez que el aplicador alcanza los extremos del trayecto, garantizando así la seguridad mecánica y la precisión operativa.

Para la operación remota, el sistema integra un módulo Bluetooth Z2-040, conectado a los pines TX y RX del Arduino, y un módulo de radiofrecuencia (2262/2272 a 315 MHz), cuyas salidas están conectadas a los pines 9 y 11 del Arduino. Estos módulos permiten la interacción remota mediante dispositivos móviles o controles inalámbricos, facilitando la selección de velocidad y dirección sin necesidad de intervención física directa. Además, el diseño incluye un botón para encender una bomba de vacío conectado al pin digital 2 del Arduino, y un botón de parada de emergencia ("stop") conectado al pin digital 3, que permite detener el sistema en cualquier momento, proporcionando una capa adicional de control y seguridad. Para lograr el efecto deseado en el dispositivo, se consideró el siguiente programa de aplicación en Arduino, que controla las variables de fase de cada dispositivo, haciendo así que la máquina tenga rutinas de proceso o control de manera semiautomática, quedando el programa de la siguiente manera.

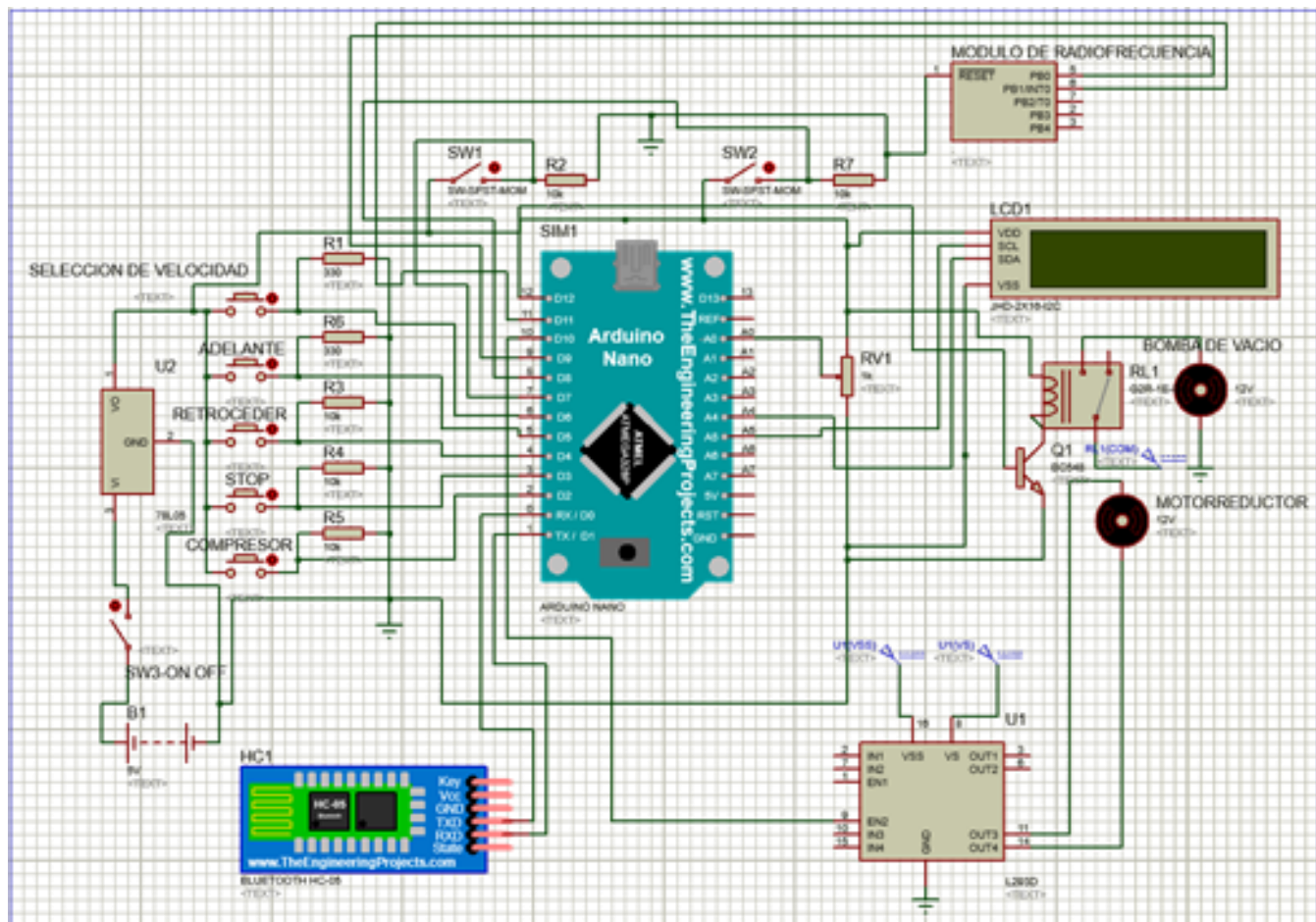


Figura 7: Diagrama del sistema de control.

La Figura 7 muestra el diagrama del sistema de control basado en un Arduino Nano, que gestiona las entradas y salidas necesarias para la operación de la máquina de Tape Casting. Los componentes del Tape Casting para su automatización constan de los siguientes elementos; **Motorreductor:** Controlado por el driver L293D, que recibe señales PWM para regular la velocidad y la dirección del motor. **Selección de velocidad:** A través de un potenciómetro y un conjunto de botones, se ajusta la velocidad del motor de manera manual. **Limit switches:** Dos switches colocados en los extremos del recorrido del aplicador, conectados a los pines digitales del Arduino, garantizan que el motor se detenga cuando el aplicador alcanza los límites. **Control remoto:** Incluye módulos de radiofrecuencia y Bluetooth, que permiten al operador ajustar los parámetros del sistema sin interacción física directa. **Pantalla LCD:** Proporciona una interfaz visual para mostrar el estado del sistema y los parámetros de funcionamiento, facilitando la supervisión en tiempo real.

Para garantizar el funcionamiento óptimo del dispositivo, se diseñó un programa en Arduino que permite controlar las variables de fase de cada componente, lo que habilita a la máquina para ejecutar rutinas de proceso y control de manera semiautomática. El programa desarrollado coordina las

operaciones de los distintos módulos, permitiendo una interacción eficiente entre el hardware y el software.

El desarrollo del software y su interfaz de control se realizó bajo una configuración de frecuencia óptima para los componentes electrónicos. La integración de estos circuitos electrónicos sigue los lineamientos establecidos por la norma IEC 61082, lo que garantiza la seguridad y el cumplimiento de los estándares internacionales de diseño y documentación.

El lazo de control del sentido de giro del motor el control, ya sea en sentido horario o antihorario, se logra mediante la inversión de la polaridad del motor a través del driver L293D. Este cambio puede realizarse tanto de manera manual, utilizando botones físicos, como de manera remota. Sin embargo, al igual que el lazo de velocidad, este es un lazo abierto, ya que no se recibe retroalimentación sobre si el motor está efectivamente girando en la dirección deseada. Esto podría representar una limitación en cuanto al monitoreo preciso del estado del sistema. El lazo de control de posición del aplicador está basado en limit switches estratégicamente colocados en los extremos del recorrido. Cuando el aplicador alcanza estos límites, los switches envían una señal al Arduino para detener el motor, garantizando que el aplicador no exceda su rango de movimiento. Este es un lazo cerrado, ya que existe

retroalimentación directa al Arduino, lo que permite una mayor precisión en el control de la posición del aplicador, previniendo errores y daños mecánicos.

El lazo de control remoto permite ajustar tanto la velocidad como la dirección del motor mediante un módulo de comunicación inalámbrica (Bluetooth o RF). A pesar de la facilidad que proporciona en términos de control a distancia, este sigue siendo un lazo abierto, ya que no hay retroalimentación automática sobre el estado del motor una vez ejecutados los comandos. La ausencia de retroalimentación puede comprometer el control preciso en escenarios de operación remota.

La máquina cuenta con tres sistemas específicos de control (Figura 8): a) *Tablero de control físico*: Incluye una perilla para ajustar la velocidad del motor, así como botones que permiten el manejo de las funciones básicas del equipo. b) *Control a través de aplicación móvil*: Se desarrolló una aplicación compatible con plataformas iOS y Android, que permite al usuario controlar el equipo mediante conexión Bluetooth, ofreciendo una interfaz sencilla e intuitiva para ajustar parámetros como la velocidad y la dirección del motor. c) *Control remoto*: El dispositivo de control remoto está fabricado en plástico ABS e incorpora componentes electrónicos que permiten la gestión inalámbrica de las funciones del equipo.

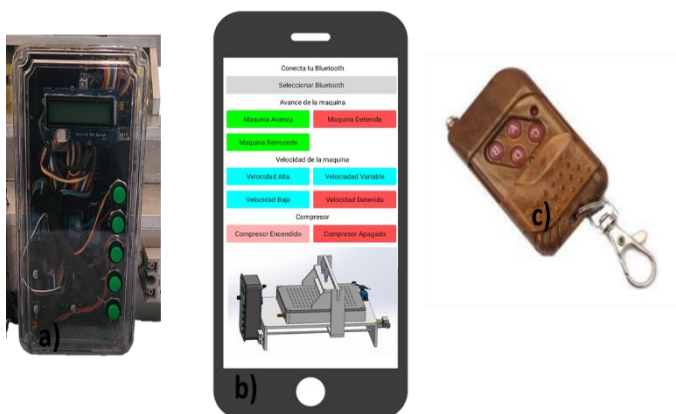


Figura 8: Sistemas de control a) Tablero de control, b) Control desde aplicación móvil bluetooth, c) Control remoto.

3.3. Caracterización y Validación del funcionamiento del Tape Casting.

La Figura 9 muestra el espectro FT-IR de la película de PVA obtenida en el prototipo Tape Casting. Las bandas de absorción observadas son características del polímero PVA. Las bandas entre 3550 y 3200 cm^{-1} corresponden al estiramiento del grupo O-H, mientras que las situadas entre 2840 y 3000 cm^{-1} se asocian con el estiramiento de los enlaces C-H en los grupos alquilo. La banda a 1731 cm^{-1} indica el estiramiento de C=O, posiblemente debido a la presencia de grupos carbonílicos o trazas de acetato de vinilo, precursor del PVA, o como resultado de la oxidación del polímero. La banda a 1643 cm^{-1} corresponde a la absorción de H_2O . En 1416 cm^{-1} se observa la flexión del CH_2 ; en 1138 cm^{-1} , el estiramiento de

C-O asociado con la secuencia cristalina del PVA; y a 1083 cm^{-1} , el estiramiento de C-O y la flexión de OH en la secuencia amorfa del PVA. Finalmente, la banda a 916 cm^{-1} corresponde al balanceo de CH_2 , y la de 822 cm^{-1} , al estiramiento de C-C (Villanueva-Flores et al. 2019).

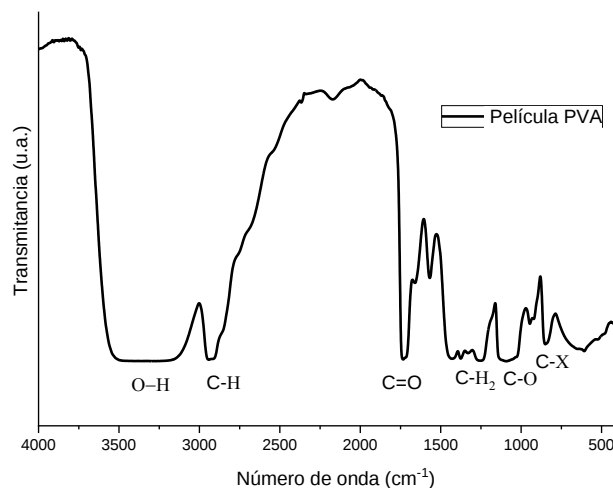


Figura 9: Espectrograma de infrarrojo de la película de PVA.

La validación de la velocidad del sistema del aplicador se llevó a cabo mediante mediciones precisas del recorrido en función del tiempo. Conocer la velocidad real es de suma importancia, ya que permite caracterizar el sistema de manera precisa, considerando factores como la fricción y la masa del dispositivo que desplaza el motorreductor, los cuales influyen directamente en la velocidad experimentada por el equipo de Tape Casting.

Durante las mediciones, se evaluaron recorridos que variaron desde 1.25 hasta 2.75 vueltas. Para ello, se seccionó el recorrido completo del potenciómetro, midiendo en grados y seleccionando valores específicos. Estas mediciones se realizaron en varias etapas del proceso de Tape Casting: al inicio del recorrido, a la mitad y justo antes de detenerse, manteniendo una distribución equidistante, los valores de la velocidad promedio con la desviación estándar se muestran en la Figura 10.

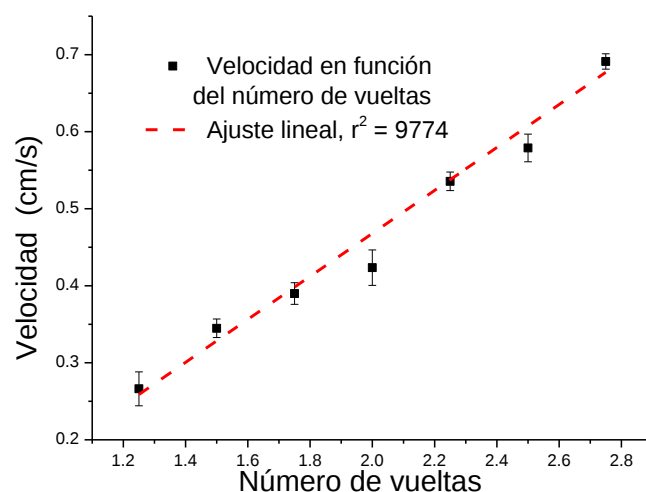


Figura 10: Valores de la velocidad en función del número de vueltas del potenciómetro.

Como resultado, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad del aplicador (cm/s)} = 0.2698(\text{número de vueltas}) - 0.0782.$$

En esta ecuación, la velocidad se midió en cm/s y el número de vueltas se calculó como los grados del potenciómetro divididos por 320°. Cada vuelta correspondió con un ángulo de giro aproximado de 32°. El coeficiente de determinación $R^2=0.9774$, lo que sugiere una fuerte correlación entre el número de vueltas y el tiempo de recorrido. Este alto valor de R^2 respalda la reproducibilidad del proceso, lo que es fundamental para mantener la consistencia en la producción de películas a velocidades optimizadas.

La Tabla 2 muestra los resultados del espesor promedio medido en cuatro puntos evaluados, con recubrimientos que varían entre 0.5 mm y 2 mm. Las desviaciones estándar en los diferentes espesores es pequeña originada por la rectificación de la base del Tape Casting.

Tabla 2: Promedio de espesores y desviación estándar en diferentes puntos de las películas de PVA.

Espesor (mm)	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
0.5	0.503 ±0.04	0.5020 ±0.05	0.5035 ±0.03	0.5015 ±0.06
1	1.000 ±0.010	1.015 ±0.017	1.018 ±0.012	1.002 ±0.011
1.5	1.505 ±0.015	1.512 ±0.013	1.510 ±0.014	1.508 ±0.016
2	2.030 ±0.020	2.025 ±0.022	2.035 ±0.021	2.028 ±0.019

Al comparar estos resultados con la literatura, autores como Yun, Kim, & Lee, (2010) también observaron un alto grado de control en la homogeneidad de los recubrimientos al utilizar procesos automatizados, como el Tape Casting. Ambos estudios destacan la importancia de optimizar las variables de proceso, tales como la velocidad y el flujo de la suspensión, para garantizar la uniformidad del espesor. De acuerdo con Hotza *et al.* (2019), la presencia de variaciones más notables en el espesor suele estar asociada a un control inadecuado de las condiciones del proceso.

Conclusiones

La automatización del sistema de Tape Casting, empleando un motorreductor controlado por un Arduino Nano, demostró ser altamente efectiva para lograr un control preciso tanto de la velocidad como de la dirección del aplicador. La preparación cuidadosa de los componentes móviles y fijos, combinada con la implementación de un sistema de control robusto, aseguró la estabilidad de prototipo. La integración de limit switches y la capacidad de operación remota proporcionaron un nivel adicional de precisión y conveniencia, permitiendo ajustes en tiempo real sin necesidad de intervención física directa. Se observa una alta correlación ($R^2=0.9774$) entre las vueltas del potenciómetro y el

tiempo de recorrido. Las películas mantienen un espesor homogéneo resultado de la rectificación y buena estabilidad del equipo. El prototipo de Tape Casting ejemplifica cómo la Industria 4.0 transforma procesos tradicionales mediante la integración de control remoto y conectividad, logrando un sistema flexible, eficiente y adaptado a las demandas modernas de producción, así como el desarrollo de aplicaciones en Android y sistemas Bluetooth, para mejorar la funcionalidad y accesibilidad de estos sistemas.

Agradecimientos

Los autores agradecen los recursos e instalaciones proporcionados por la Universidad Autónoma Metropolitana y a la Universidad Tecnológica de Tecámac para llevar a cabo la experimentación y caracterización realizadas en este trabajo.

Referencias

- Ayturan, Z. C., Ayturan, Y. A., Dalkılıç, E., & Dursun, Ş. (2019). Homemade dip-coating machine for thin films. *International Symposium for Environmental Science and Engineering Research*.
- Castillo-Vilcatoma, D. A., Loarte, S. J., Fernandez-Chillcse, A. A., Pastrana, E. C., & Pastrana, R. Y. (2021). Designing and fabrication of a low-cost dip-coater for rapid production of uniform thin films. *Química Nova*, 44(6), 732-738. DOI: 10.21577/0100-4042.20170805
- Rosales García, R. (2022). Síntesis de películas poliméricas fotoluminiscentes dopadas con complejos mononucleares Eu-ácido benzoico. (Tesis de maestría). Centro de Investigación e Innovación Tecnológica.
- Serrano-Pérez, J., Pacheco-Chávez, I., Camacho-González, M. A., Serrano-Pérez, O., & Pacheco-Martínez, J. (2023). Design and fabrication of a low-cost dip-coater revolver for uniform coating production. *Publicación Semestral Pádi*, 11(Especial 5), 109-116. DOI: 10.29057/icbi.v11iEspecial5.11694
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review. *Procedia CIRP*, 52, 16-20. DOI: 10.1109/HICSS.2016.488
- Villanueva-Flores, F., Miranda-Hernández, M., Flores-Flores, J. O., Porras-Sanjuanico, A., Hu, H., Pérez-Martínez, L., Ramírez O. T., Palomares, L. (2019). Poly(vinyl alcohol co-vinyl acetate) as a novel scaffold for mammalian cell culture and controlled drug release. *Journal of Materials Science*, 54 (10), 7867-7882. DOI: 10.1007/s10853-019-03402-1
- Campilho, R.D.S.G., Silva, F.J.G. (2023). Industrial Process Improvement by Automation and Robotics. *Machines*, 11, 1011. DOI: 10.3390/machines11111011
- Domínguez, J. E., Olivos, E., Vázquez, C., Rivera J.M., Hernández-Cortes, R., González-Benito, J., (2021). Automated low-cost device to produce sub-micrometric polymer fibers based on blow spun method. *HardwareX*, 10, 2008. DOI: 10.1016/j.ohx.2021.e00218
- Jabbari, M., Bulatova, R., Tok, A.I.Y., Bahl, C., Mitsoulis, E., Hattel, J., (2016). Ceramic tape casting: A review of current methods and trends with emphasis on rheological behaviour and flow analysis. *Materials Science and Engineering: B*. 212. 39-61. DOI: 10.1016/j.mseb.2016.07.011
- Minoo, N., Kamyar, S. (2016) Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. (2016). *Applied Materials Today*, 5, 223-245 DOI: 10.1016/j.apmt.2016.10.001
- Saleh, B., Jiang, J., Fathi, R., Al-hababi, T., Xu, Q., Wang, L., Song, D., Ma, A. (2020). 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108376. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108376
- Ahlhelm, M., Günther, P., Scheithauer, U., Schwarzer, E., Günther, A., Slawik, T., Moritz, T., & Michaelis, A. (2016). Innovative and novel manufacturing methods of ceramics and metal-ceramic composites for biomedical applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(12), 2883–2888. DOI: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2015.12.020
- da Silva, B. A., de Souza Godim de Oliveira, V., Di Luccio, M., Hotza, D., Rezwan, K., & Wilhelm, M. (2020). Characterization of functionalized

- zirconia membranes manufactured by aqueous tape casting. *Ceramics International*, 46(10), 16096–16103. DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2020.03.162
- Ji, C., Su, H., Huang, Z., Tian, X., Zeng, T., He, H., Xu, J., Wen, J., & Peng, Y. (2023). GdAG:Ce fluorescent ceramic formed by aqueous tape casting and isostatic pressing process for WLED applications. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 129(5), 1–7. DOI: 10.1007/S00339-023-06659-1
- Jonson, R. A., Yi, E., Shen, F., & Tucker, M. C. (2021). Optimization of Tape Casting for Fabrication of $\text{Li}_{6,25}\text{Al}_{0,25}\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ Sheets. *Energy and Fuels*, 35(10), 8982–8990. DOI: 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.1C00566
- Lee, J. K., Lau, G. Y., Sabharwal, M., Weber, A. Z., Peng, X., & Tucker, M. C. (2023). Titanium porous-transport layers for PEM water electrolysis prepared by tape casting. *Journal of Power Sources*, 559, 232606. DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2022.232606
- Trunec, M., Stastny, P., Kellar, J., & Pazderka, M. (2019). Effect of plasma treatment of polymeric tape carriers on wetting behaviour of aqueous ceramic tape casting slurry. *Ceramics International*, 45(7), 9381–9385. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.08.053
- Zhou, S. X., Zhu, Y., Du, H. Da, Li, B. H., & Kang, F. Y. (2012). Preparation of oriented graphite/polymer composite sheets with high thermal conductivities by tape casting. *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Materials*, 27(4), 241–249. DOI: 10.1016/S1872-5805(12)60015-8
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Suman, R., Santibañez-Gonzalez, E. (2020). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 203–217. DOI: 10.1016/j.susoc.2022.01.008
- Hotza, D., Nishihara, R. K., Machado, R. A. F., Geffroy, P. M., Chartier, T., & Bernard, S. (2019). Tape casting of preceramic polymers toward advanced ceramics: A review. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, 1(1), 21–41. DOI: 10.1002/ces2.10009
- Yun, S., Kim, J., & Lee, K. S. (2010). Evaluación de papel electroactivo de celulosa elaborado mediante métodos de colada en cinta y estiramiento por zonas. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11(6), 987–990. DOI : 10.1007/s12541-010-0120-2