

Desarrollo de un sistema para el control de posición en los ejes X, Y, Z de un sistema inyector-colector en el proceso de electrohilado de andamios de nanofibras

Development of a system for position control in the X, Y, Z axes of an injector-collector system in the electro-sanding process of nanofiber scaffolds

Desenvolvimento de um sistema para o controle de posição nos eixos X, Y, Z de um sistema injetor-coletor para o processo de electrohilado de andamios de nanofibras

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Becerra Martínez, E. R., Durán, O., Vera-Graziano, R., Muñoz Prieto, E. y Gómez-Pachón, E. (2017). Desarrollo de un sistema para el control de posición en los ejes X, Y, Z de un sistema inyector-colector en el proceso de electrohilado de andamios de nanofibras. *Ingenio Magno*, 8(1), 118-131.

Eduar R. Becerra-Martínez

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Facultad Duitama, Escuela de Licenciatura
en Educación Industrial, Grupo de Investigación
Diseño, Innovación y Asistencia Técnica
para Materiales (DITMAV)
eduar.becerra@uptc.edu.co

Oliverio Durán

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Facultad Duitama, Escuela de Licenciatura
en Educación Industrial
oliverio.duran@uptc.edu.co

Ricardo Vera-Graziano

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Investigaciones en Materiales,
Departamento de Polímeros
graziano@unam.mx

Efrén Muñoz-Prieto

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Facultad de Ciencias Básicas, Escuela de
Ciencias Químicas,
Grupo de Investigación Desarrollo y Aplicación de
Nuevos Materiales (DANUM)
efren.munoz@uptc.edu.co

Edwin Y. Gómez-Pachón

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Facultad Duitama, Escuela de Diseño Industrial,
Grupo de Investigación Diseño,
Innovación y Asistencia Técnica
para Materiales (DITMAV)
edwin.gomez02@uptc.edu.co

Resumen

Este artículo muestra el diseño y la implementación de un sistema de control electrónico que posiciona un inyector que emite un flujo polimérico respecto a un colector donde se depositan fibras sólidas en un equipo de electrohilado utilizado en la preparación de nanofibras poliméricas. Recientes estudios evidencian la relación entre la calidad de la superficie y morfología de las fibras a escala micronanométrica y el control del posicionamiento inyector-colector de la técnica de electrohilado. El sistema de control electrónico está compuesto de etapas fundamentales: interfaz para la interacción usuario-máquina, actuadores que permiten el posicionamiento en los tres ejes cartesianos, potencia para el adecuado control de los actuadores, alimentación que genera las señales necesarias para el adecuado funcionamiento del sistema. El sistema electrónico se plantea con base en pruebas realizadas para determinar la relación de distancia del inyector a colector y el diámetro promedio de fibra, así como los datos obtenidos en diferentes posiciones en un solo eje. Las pruebas fueron realizadas en el Instituto de Investigación en Materiales (IIM) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con el fin desarrollar un sistema de electrohilado en la Universidad Pedagógica y Tecnología de Colombia (UPTC). Las fibras se caracterizaron por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido. A partir del diseño y la implementación del sistema electrónico, se logró hacer un aporte significativo en la técnica de electrohilado; esto permitirá hacer más eficiente el proceso, pues se aumentará el índice de reproducibilidad en los experimentos para la investigación en la preparación de nanofibras.

Palabras clave: colector, control electrónico, electrohilado, inyector, nanofibras, posicionamiento.

Abstract

This article shows the design and implementation of an electronic control system that positions an injector that emits a polymer flow with respect to a manifold where solid fibers are deposited by electrospinning equipment used in the preparation of polymer nanofibers. Recent studies show the relationship between surface quality and fiber morphology at a micronanometric scale and the control of the nozzle-collector positioning of the electrospinning technique. The electronic control system consists of some fundamental stages: user-machine interaction interface, actuators that allow positioning on all three Cartesian axes, power for proper control of the actuators and a power supply that generates the necessary signals for the proper operation of the system. The electronic system is based on tests performed to determine the distance ratio of the injector to the collector and the average fiber diameter, as well as the data obtained in different positions on a single axis. The tests were carried out at the Materials Research Institute (IIM) of the National Autonomous University of Mexico (UNAM), in order to develop an electrospinning system at the Pedagogical University and Technology of Colombia (UPTC). The fibers were characterized using a scanning electron microscopy technique. From the design and implementation of the electronic system, it was possible to make a significant contribution to the technique of electrospinning; this

will enable the process to become more efficient, as it will increase the reproducibility index in investigations for the research of the preparation of nanofibres.

Keywords: collector, electronic control, electro-silo, injector, nanofibres, positioning.

Resumo

Neste artigo se apresenta o projeto e implementação de um sistema de controle eletrônico que posiciona um injetor que emite um fluxo de polímero em relação a um colector aonde as fibras sólidas são depositadas em um equipamento de eletrofição utilizado na preparação de nanofibras de polímero. Estudos recentes têm evidenciado a relação entre a qualidade da superfície e a morfologia da fibra na escala micronanométrica e o controle do posicionamento injetor-coletor da técnica de eletrofição. O sistema de controle eletrônico se compõe em etapas fundamentais: interface de interação usuário-máquina, atuadores que permitem o posicionamento em todos os três eixos cartesianos, potência para o controle adequado dos atuadores, fonte de alimentação que gera os sinais necessários para o bom funcionamento do sistema. O sistema eletrônico baseia-se em testes realizados para determinar a proporção de distância do injetor para o coletor e o diâmetro médio da fibra, bem como os dados obtidos em diferentes posições em um único eixo. Os testes foram realizados no Instituto de Pesquisa de Materiais (IIM) da Universidade Nacional Autônoma do México (UNAM), para desenvolver um sistema de eletrofição na Universidade Pedagógica e Tecnologia da Colômbia (UPTC). As fibras foram caracterizadas por medio da técnica de microscopia eletrônica de varredura. A partir do projeto e implementação do sistema eletrônico, foi possível fazer uma contribuição significativa na técnica de eletrofição; Isso permitirá tornar o processo mais eficiente, pois o índice de reprodutibilidade nos experimentos de pesquisa na preparação de nanofibras pode ser aumentado.

Palavras chave: coletor, controle eletrônico, eletro-silo, injetor, nanofibras, posicionamento.

I. Introducción

El proceso de electrohilado es una técnica antigua que tiene su origen hace más de sesenta años (Nandana, 2010); en principio se publicó una serie de patentes realizadas por Formhals (1934), donde se estudió la obtención de filamentos de polímeros utilizando fuerzas electrostáticas. En sus inicios, este proceso recibía el nombre de *hilado electrostático*, el cual fue modificado a principios de los noventa para dar paso a la tecnología utilizada actualmente denominada *electrohilado* (*electrospinning*).

Con este proceso se obtienen fibras de diferentes clases de polímeros, con un diámetro a escala de algunas decenas de nanómetros hasta la escala de micrómetros (Stepanyan *et al.*, 2014).

Este proceso es versátil y pueden obtenerse fibras de diversos tipos de polímeros diluidos en un solvente polar, para luego inyectarlo por medio de una aguja impulsada por una bomba de inyección. Se necesita de una fuente de voltaje para producir una diferencia de potencial, a razón de kilovoltios, entre la punta de la aguja

(capilar) y un colector de aluminio, en el cual se depositan las fibras como se muestra en la figura 1.

Existen varias técnicas de electrohilado que permiten la obtención de fibras de diferentes polímeros con características singulares en cada caso. Algunas de las técnicas de electrohilado son el electrohilado vertical (Sureeporn Koombhongse, 2001) (figura 1a), donde el polímero, por acción de la gravedad, cae por el capilar hasta convertirse en fibras gracias a la acción del campo eléctrico, y el electrohilado horizontal (figura 1b), donde es necesario utilizar una bomba de inyección para poder empujar el polímero por medio del capilar hasta que se convierta en fibras.

Debido a la simplicidad de este proceso para la obtención de nanofibras o microfibras, ya sea de biopolímeros o polímeros sintéticos no biodegradables, se ha diversificado su uso, a partir de lo cual se han obtenido aplicaciones en el ámbito de la ciencia, la medicina y la tecnología. Las nanofibras, dispuestas en forma de estructuras llamadas *andamios*, tienen mucho potencial para su aplicación en procesos de filtración, ropa protectora, sensores, sistemas electrónicos, ámbito espacial, ingeniería de tejidos (Gómez-Pachón *et al.*, 2013) y biomedicina (Villarreal-Gómez *et al.*, 2015). Estas dos últimas constituyen los ámbitos donde más se utilizan e investigan para poder realizar regeneración de tejidos, liberación controlada de fármacos, entre otros usos. Las últimas investigaciones también indican que esta técnica está siendo combinada con otras como la manufactura aditiva, con el fin de crear estructuras tridimensionales para la regeneración de partes específicas del cuerpo.

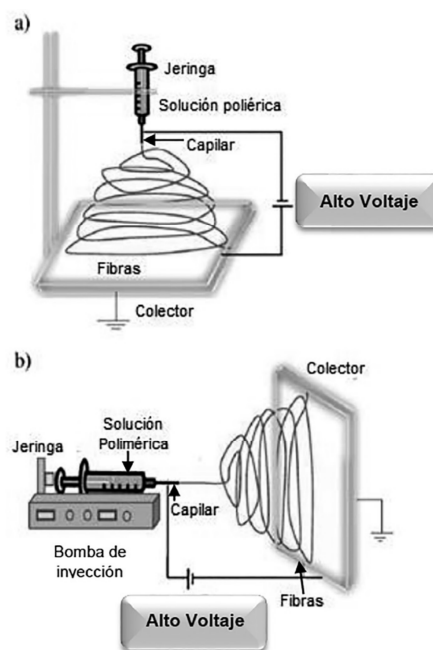


Figura 1. a) Diagrama electrohilado vertical, b) diagrama electrohilado horizontal

Fuente: Bhardwaj (2010).

Algunos de los sistemas de control para equipos de electrohilado que se han creado se encuentran en el ámbito investigativo e industrial. Así, Sautter (2005) diseñó un sistema de posicionamiento para el inyector que controla un solo eje, donde opera la distancia entre los electrodos del equipo, es decir, acerca el inyector y el colector de forma perpendicular. Otro avance es un sistema netamente industrial, aunque no se conoce en su totalidad su funcionamiento; este sistema lo ofrece la compañía Spraybase® y controla los tres ejes (X, Y, Z), pero, por su naturaleza comercial, se conoce muy poco de este, ya que pertenece al *know-how* desarrollado por la empresa.

En los sistemas utilizados en investigación académica se pueden encontrar falencias significativas en el sistema de posicionamiento inyector/colector; en su gran mayoría se encuentra que esta variable es intervenida

netamente en forma manual, como se muestra en la figura 2. Se puede observar que el colector se encuentra posado sobre una pieza de madera que se posiciona visual y manualmente mediante cinta métrica; este método acarrea errores significativos debido a que es difícil reproducir la misma posición dos veces. Tal falencia indica que esta máquina carece de precisión (Dehong Huo, 2009) y, como resultado, siempre cambiarán las características de las pruebas realizadas. Por todo lo anterior, se muestra que el control de esta variable es un vacío investigativo, porque no se ha reportado un trabajo que permita dejar de lado los sistemas netamente manuales y utilizar la electrónica como apoyo y mejora del proceso de electrohilado, o que describa cómo este proceso le ha dado mejoras a la electrónica (Miao *et al.*, 2010).

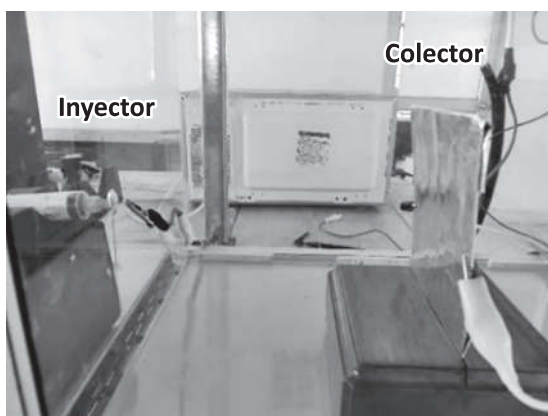


Figura 2. Posicionamiento manual inyector/colector en el equipo de electrohilado de la UPTC

Con base en lo anterior, se determinó la necesidad de realizar una investigación para diseñar un sistema eficaz que controle el posicionamiento inyector/colector de los equipos de electrohilado, con el fin de obtener una mejora en reproducibilidad en dicho proceso y una mejor interacción de la máquina con los usuarios.

II. Materiales y métodos

Para la realización de este proyecto se usó el equipo de electrohilado de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC, 2014). Este equipo se encuentra en el estado mostrado en la figura 3a, y no tiene intervención significativa de diseño y estructuración, para poder generar una mejora en el proceso. En la figura 3b se muestra la parte estructural del diseño de equipo de electrohilado realizado por Brahayán Suárez (Ramírez, 2015) (prototipo 1), el cual presenta mejoras en diseño.

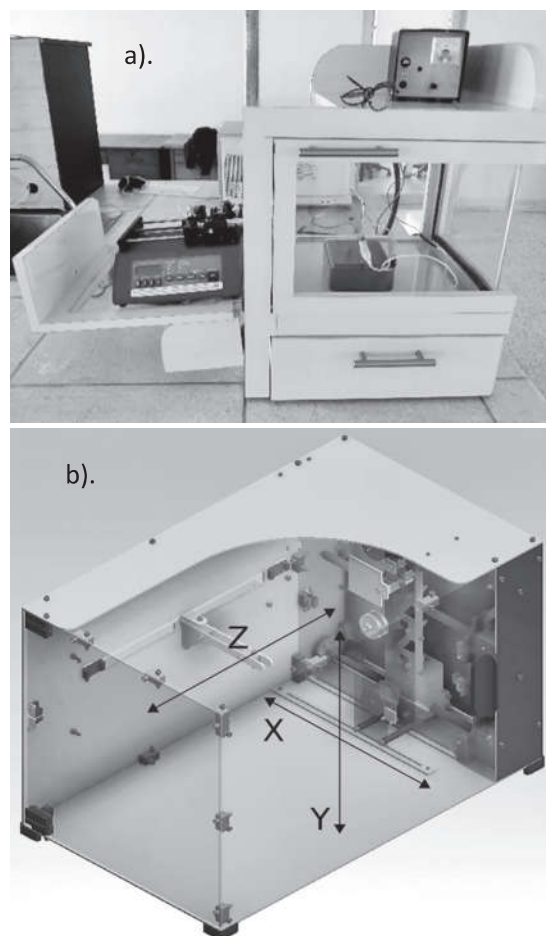


Figura 3. a) Equipo de electrohilado actual, b) prototipo 1 rediseñado por Brahayán Suárez

El anterior equipo (prototipo 1, figura 3b) fue planteado inicialmente para implementar el control electrónico; sin embargo, debido a mejoras de diseño, se replanteó dicho equipo por el prototipo 2 (figura 4) realizado por Juan David Villate y Sergio Leonardo Rúa, en el proyecto de pregrado en curso denominado “Configuración y desarrollo de un sistema de interacción y usabilidad para el desarrollo de la técnica de *electrospinning*”.



Figura 4. Prototipo 2 de equipo de electrohilado
Fuente: Juan David Villate y Sergio Leonardo Rúa.

El equipo de hilado consta de una bomba de inyección (Syringepump NE4000), fuente de alto voltaje (Amazing HV350R) y cabina de hilado (fabricación institucional en la UPTC). El sistema electrónico para el posicionamiento inyector-colector se plantea con base en las pruebas realizadas en el Instituto de Investigación en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIM-UNAM), en Ciudad de México. Para verificar la pertinencia del proyecto, se trabajó un sistema de posición en solo un eje, compuesto por un MPAP (pololu con 28 cm de plomo tornillo: bipolar, 200 pasos/rev, 42×38 mm, 2,8 V, 1,7 A/fase), y se usó para el control del MPAP un driver (pololu DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current). Con todos los anteriores elementos, y para realizar las pruebas en el IIM-UNAM, se construyó el sistema que se muestra en la figura 5; allí se evidencia el uso de un MPAP con

eje roscado, con la finalidad de alejar o acercar el colector de la punta del capilar para lograr hilar con longitudes precisas y así determinar un comportamiento de las fibras respecto al diámetro.

Con el anterior sistema se procedió a hacer pruebas de electrohilado con soluciones de Poli (ácido láctico) (PLA) (NatureWorks), a una concentración de la solución 13% peso/volumen, utilizando como disolvente trifluoroetanol (2,2,2 sigma aldrich), variando la distancia inyector-colector. Cada prueba se realizó variando la distancia en un centímetro, comenzando con una distancia desde la punta del capilar al colector de 6 cm y finalizando en 21 cm; se obtuvo así un andamio por prueba.

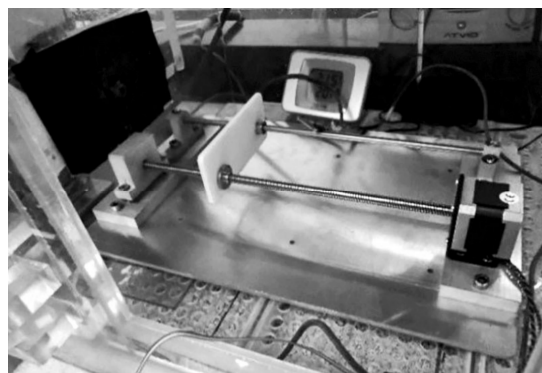


Figura 5. Sistema de posicionamiento IIM-UNAM

Las fibras se caracterizaron por medio de microscopía electrónica de barrido MEB (JEOL 7600F), obteniendo micrografías a 10.000 aumentos, lo cual se realizó con el fin de medir el diámetro de las fibras. Para ello se analizaron cuatro fibras por imagen y cincuenta mediciones por fibra, a través del *software* Image J, como se muestra en la figura 6. Allí se evidencia la imagen original de MEB y una segunda con un cambio en el brillo y contraste de los colores originales de la micrografía. Lo anterior se debe a que en pruebas realizadas con anterioridad se observó que la medición de diámetros con la micrografía original en

escala de grises generaba inconvenientes al momento de identificar la longitud de las fibras en el lugar donde se superponían dos o más de estas. También se observan las mediciones

realizadas con el programa Image J a las fibras para proceder a la medición y el análisis de los diámetros.

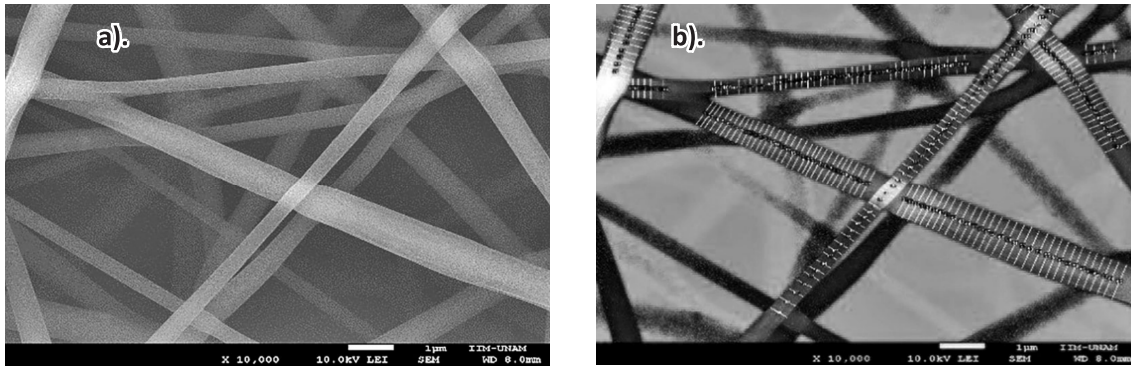


Figura 6. a) Micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de barrido, b) micrografía con arreglo de brillo y contraste y con medidas de diámetro

En la figura 7 se evidencia el diagrama de tareas a seguir con cada una de las etapas y sus respectivas subetapas, para así finalizar con la entrega funcional del sistema de control de posicionamiento inyector/colector de la máquina de electrohilado de la UPTC.

III. Resultados

Como resultado de las pruebas realizadas en el IIM-UNAM, se obtuvo un diámetro inicial de 644 ± 22 nm al hilar a una distancia desde inyector-colector de 6 cm, y se finalizó con un diámetro de 580 ± 15 nm al hilar a una distancia inyector-colector de 21 cm, lo cual mostró que, al mantener constante todos los parámetros del electrohilado y variando la distancia inyector-colector, el diámetro de las fibras dis-

minuye cuando se aumenta la distancia entre el inyector y el colector. Este es un resultado similar al observado en las pruebas realizadas en el trabajo de Thompson *et al.* (2007), donde se muestra la relación directa entre el radio de la fibra y la distancia al inyector o capilar.

Las pruebas realizadas sirvieron de base para plantear la hipótesis de que la realización de un control electrónico de la variable distancia inyector-colector permitiría obtener una preparación uniforme de tamaños de las nanofibras (Greiner y Wendorff, 2007), por lo que se espera que en las pruebas, para determinar el comportamiento del diámetro de fibra (Bogdan Cramariuc, 2013) en polímeros como PLA, muestren un comportamiento inversamente proporcional a la distancia inyector/colector.

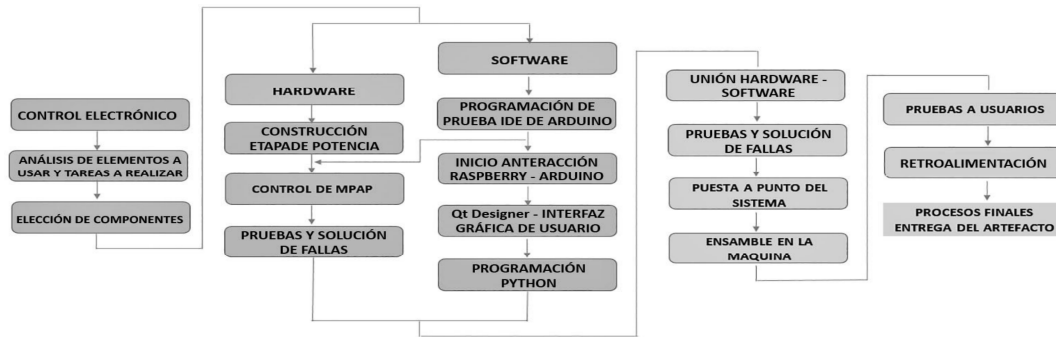


Figura 7. Diagrama de tareas del proyecto

La estructura general del sistema electrónico para el control del posicionamiento inyector/colector se muestra en el diagrama de bloques

de la figura 8, en el cual se evidencian las diferentes etapas que lo componen.

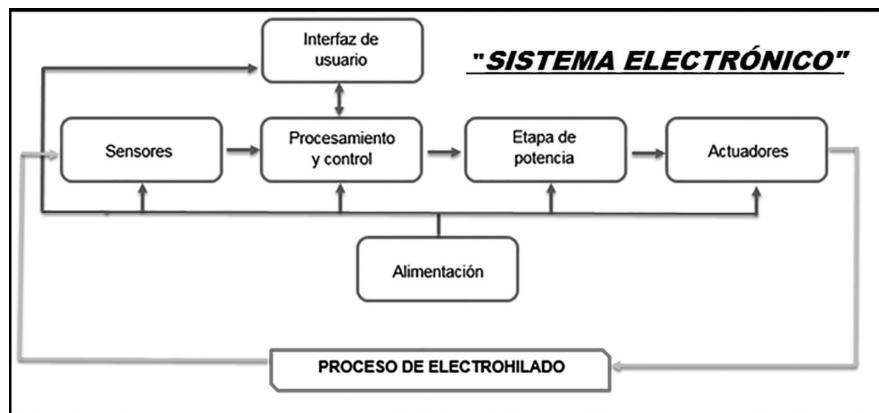


Figura 8. Representación del sistema electrónico

Etapa de actuadores. Permite generar el posicionamiento en cada uno de los ejes, para lo cual se eligieron los motores paso a paso marca Pololu, número de pieza 1200, cuyas especificaciones se muestran en la tabla 1. Se seleccionó este motor por cuanto permite generar pequeños movimientos controlables y precisos, lo que facilitó el desplazamiento en los tres ejes cartesianos con buena resolución, así como obtener un mayor índice de repetitividad en coordenadas iguales al momento de usarlas en pruebas aleatorias. Este motor posee una par de retención de 3,2 kg-cm, lo cual garantiza la generación de fuerza suficiente para mover el sistema mecánico y cumplir

con los requerimientos realizados en el trabajo de pregrado de Brahayán Suárez (Ramírez, 2015).

Etapa de potencia. Para lograr el control de los actuadores, se utilizó el driver DRV8825, del cual se muestran sus especificaciones en la tabla 2. Este driver cuenta con un rango de tensión y corriente de trabajo acorde con las especificaciones del motor; por tanto, permite manejarlo con facilidad y a mayor resolución, lo que beneficia el parámetro de control de movimiento, es decir, aunque la resolución de fábrica del motor es de 200 pasos por vuelta, se puede incrementar hasta 3200 pasos por revolución.

Tabla 1. Especificaciones del motor elegido para el sistema

Dimensiones	Tamaño	42,3 × 48 mm
	Peso	350 g
Especificaciones generales	Tipo de eje	5 mm "D"
	Pasos por revolución	200
	Corriente por fase	1200 mA por bobina
	Voltaje	4 V
	Par de retención	3,2 kg-cm
	Resistencia	3,3 Ω por bobina
	Numero de cables	6
	Longitud del cable	30 cm

Tabla 2. Especificaciones del driver elegido para el sistema

Especificaciones generales	
Tensión mínima de trabajo	8,2 V
Tensión máxima de funcionamiento	45 V
Corriente constante por fase	1,5 A
Corriente máxima por fase	2,2 A
Voltaje lógico mínimo	2,5 V
Voltaje lógico máximo	5,25 V
Resoluciones de micropaso	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32.

Etapa de alimentación. El sistema electrónico está alimentando por medio de una fuente de 24 V y 10 A (MW mean well – SP-240-24), suficiente para poder alimentar actuadores, sensores, procesamiento y control y potencia.

Etapa de procesamiento y control. Debido a las exigencias del proceso de electrohilado referente al número de variables que se deben manejar, y a que debe contarse con una interfaz gráfica que facilite la interacción entre el

usuario y el proceso, no fue viable dejar como elemento de control un sistema basado en un microcontrolador. Asimismo, para obtener eficiencia en el manejo del proceso de electrohilado, la etapa de control se debió integrar al cuerpo de la máquina, lo cual eliminaba la posibilidad de usar un PC como elemento de procesamiento y control. Por las razones mencionadas, se eligió el sistema de desarrollo Raspberry pi B+, que consiste en un sistema

cuyo núcleo es un microprocesador que cuenta con un sistema operativo propio basado en Linux. Para la codificación de algoritmos en este sistema de desarrollo se usaron herramientas de *software* libre como Python y Qt Creator.

Para diseño de la interfaz gráfica se usó la herramienta Qt Designer, empleada por la

facilidad que brinda para crear ambientes gráficos de fácil interpretación y porque las aplicaciones creadas allí interactúan con facilidad con el lenguaje de programación Python, el cual fue utilizado para generar el algoritmo de control y manipular el sistema a lazo abierto que controlara la variable *posiciónamiento inyector-colector*.

Tabla 3. Especificaciones del microcomputador Raspberry elegido para el sistema

Características	
Procesador	Broadcom BCM2835 SoC full HD
RAM	512 MB SDRAM 400 MHz
Almacenamiento	tarjeta microSD
USB	4 puertos USB 2.0
Pines GPIO	40

Para cumplir el parámetro de la obtención de una interfaz gráfica de fácil interpretación se incluyeron las siguientes pestañas:

- *Bienvenida*, donde el usuario encontrará un breve mensaje que le dará a conocer el título del control electrónico y una explicación de la tarea que cumple este sistema.

- *Ayuda* (figura 9), donde se encuentran ítems como tutoriales escritos y audiovisuales, con el fin de brindar la información de cómo usar cada una de las partes de este control electrónico. También encontrará un ítem relacionado con la descripción general del equipo de electrohilado, así como las partes y una breve explicación de cada una.

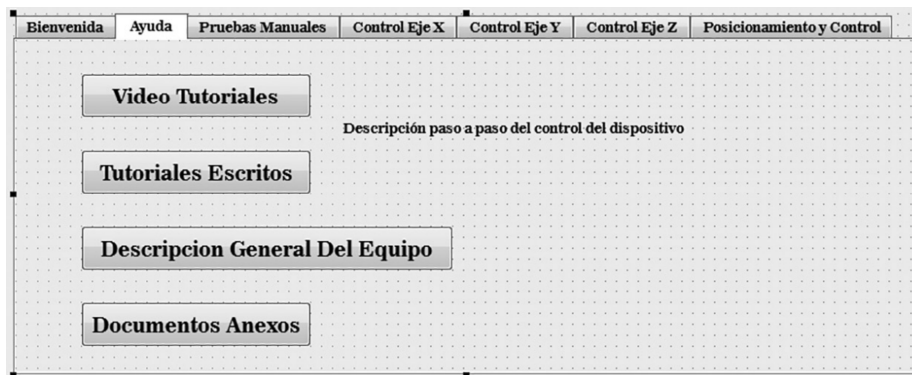


Figura 9. Interfaz gráfica de la pestaña de ayuda

- *Prueba manual de posicionamiento* (figura 10), que permitirá interactuar con el movimiento de cada uno de los ejes, con la finalidad de conocer la dirección y el eje al cual corresponden los botones encontrados.
- *Control de ejes X, Y, Z* (figura 11), tres pestañas similares, donde, por medio de ima-

gen, se mostrará el eje correspondiente a cada pestaña; también permitirá manejar desde la dirección deseada para cada eje, hasta el número de pasos y la resolución a la cual se desea generar el movimiento, datos que se guardarán para luego ser ejecutados desde la siguiente pestaña.

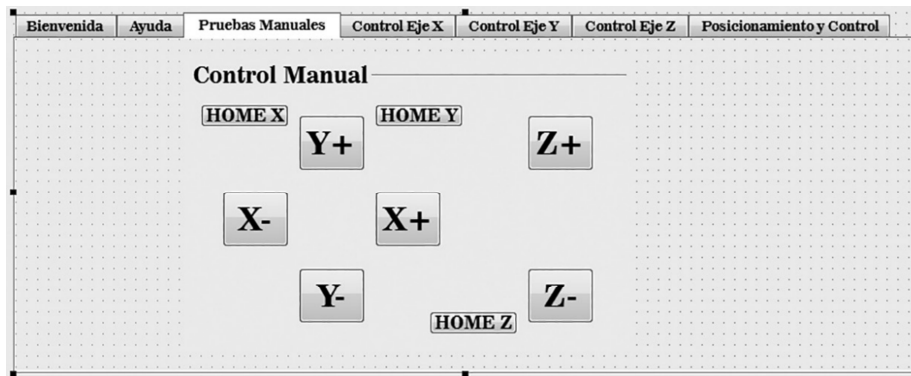


Figura 10. Interfaz gráfica de pestaña de prueba manual

- *Posicionamiento y control* (figura 12), encargada de enviar las señales de control al arduino para generar el movimiento de los motores y así realizar el posicionamiento

previamente registrado. Asimismo, permite al usuario llevar la máquina hasta su "HOME" o coordenada (0, 0, 0).

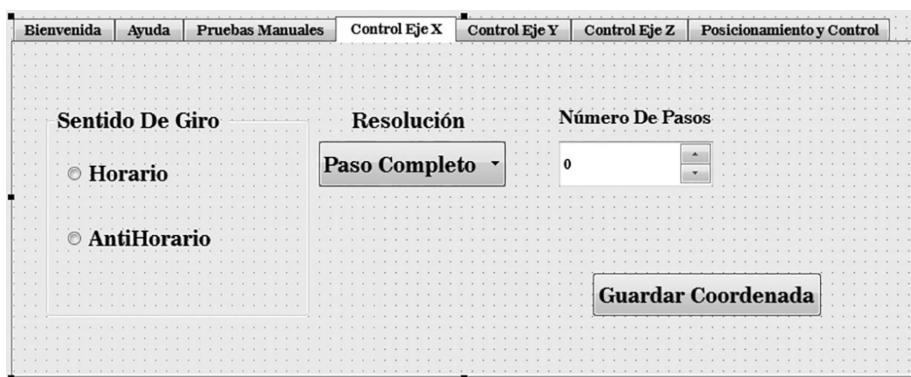


Figura 11. Interfaz gráfica de la pestaña de control de eje X

Luego se desarrolló la optimización del sistema de control mediante la selección y ubicación adecuada de sensores que permiten la realimentación de la posición de cada eje,

así como de la implementación de una estrategia de control adecuada, codificada en un algoritmo.

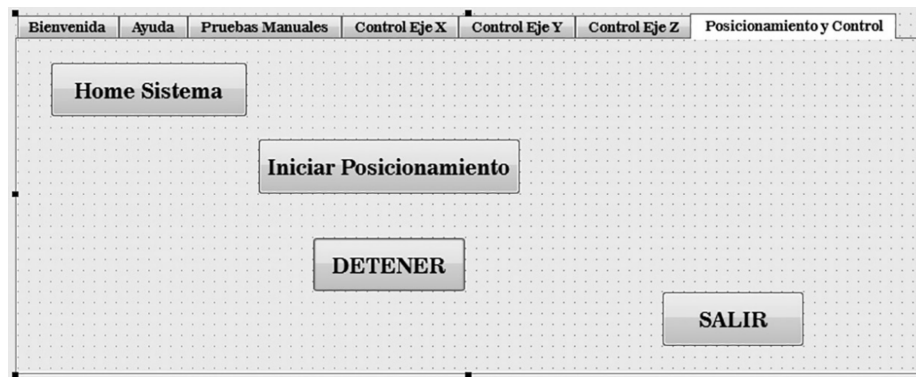


Figura 12. Interfaz gráfica de la pestaña de posicionamiento y control

Para permitir la interacción entre el usuario y la máquina de electrohilado a través de la interfaz gráfica de usuario, se utilizó una pantalla LCD táctil de 7", lo cual daba la posibilidad de que el usuario ingresara los datos necesarios para modificar las variables de posicionamiento. Además, en esta etapa se empleó una tarjeta Arduino, sistema basado en un microcontrolador de la familia ATMEL que actúa como interfaz entre el elemento principal de control "Raspberry" y el manejo de los actuadores y sensores, a través de una conexión USB.

Las funciones principales que realiza esta tarjeta son:

- Generar las señales a un voltaje adecuado para poder controlar los MPAP.
- Retornar algunas señales analógicas provenientes de sensores como de temperatura, humedad relativa y finales de carrera; con esto se genera seguridad al sistema contra excesos de desplazamiento y paro de emergencia, así como advertencias debido a fallas posibles en el proceso de electrohilado. Dichas señales se transmitirán a Raspberry con la finalidad de monitorear o generar reportes en tablas o gráficas.

El montaje realizado para las pruebas generales del sistema sin carga consistió en poner

en funcionamiento los motores por medio de la interfaz gráfica y teniendo como cerebro principal la Raspberry y como intermediario la tarjeta Arduino. Se comprobó así el funcionamiento de la interfaz y que la transmisión de datos para generar el movimiento de los motores de forma ordenada se realizara; como resultado, se obtuvo el control de los motores que obedecieron a las diferentes resoluciones y pasos manipulados desde la interfaz gráfica.

Al implementar el sistema electrónico diseñado en el prototipo 1 (figura 3.b), se logró controlar el movimiento de los tres ejes de manera adecuada; cada una de las órdenes que se enviaron al motor por medio de la interfaz gráfica fueron cumplidas a cabalidad. Sin embargo, el prototipo 1 era susceptible a algunas mejoras en el sistema mecánico de transmisión de movimiento y debido a esto surge el prototipo 2 (figura 4), en el cual se espera implementar el sistema electrónico con algunas mejoras en la interfaz de usuario y en la estrategia de control.

IV. Conclusiones

Según las pruebas de control de movimiento, resolución, sentido de giro, entre otras, se concluye que el sistema electrónico es la solución a la brecha que existe a la manipulación

que se le da a la variable *distancia inyector-colector*, en el ámbito del electrohilado, logrando así una mejora en la repetitividad de pruebas realizadas.

Debido al uso de herramientas de *hardware* abierto y *software* libre, específicamente Raspberry y Arduino, se facilitó el diseño y desarrollo de aplicaciones orientadas a masificar el uso de nuevas tecnologías en la implementación del sistema de electrohilado planteado. Además, el control electrónico, al manejar un sistema mecánico de transmisión de movimiento de buena resolución, permitió generar desplazamientos de mayor precisión en cada uno de los ejes.

El uso del *driver* DRV8825 permitió controlar con mayor resolución los movimientos de los motores y el grado de precisión en los desplazamientos de cada eje, lo cual redundará en la creación de nanofibras con diámetros controlados al mantener las demás variables constantes.

Referencias

Bogdan Cramariuc, R. C. (2013). Fiber diameter in electrospinning process. *Journal of Electrostatics*, 71, 189-198.

Dehong Huo, K. C. (2009). Design of precision machines. En *Machining dynamics* (pp. 283-321). Londres: Springer London.

Formhals, A. (1934). *US Patent 1 975 504*.

Gomez-Pachon, E. Y. *et al.* (2013). Characterisation and modelling of the elastic properties of poly(lactic acid) nanofibre scaffolds. *Journal of Materials Science*, 48(23), 8308-8319.

Greiner, A. y Wendorff, J. H. (2007). Electrospinning: A fascinating method for the prepara-

tion of ultrathin fibers. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(30).

Miao, J., Miyauchi, M., Simmons, T. J., Dordick, J. S. y Linhardt, R. J. (2010). Electrospinning of nanomaterials and applications in electronic components and devices. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10, 5507-5519.

Nandana Bhardwaj, S. C. (2010). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advance*, 28, 325 - 347.

Rámirez, B. X. (2015). *Desarrollo tecnológico de un sistema de posicionamiento y colección de nanofibras poliméricas bajo la técnica de electrohilado* (tesis de pregrado). Duitama: Univesidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Sautter, B. P. (2005). *Continuous polymer nanofibers using electrospinning*. Chicago: University of Illinois.

Spraybase (s. f.). *Technologies, solution electrospinning*. Recuperado de http://static.squarespace.com/static/50ec5484e4b00335962b12b1/t/525b3009e4b06e05e7cec37e/1381707789886/Spraybase_platform.jpg?format=300w

Stepanyan, R., Subbotin, A. V., Cuperes, L. y Bulters, M. (2014). Fiber diameter control in electrospinning. *Applied Physics Letters*, 105(173105).

Sun, B., Long, Y. Z., Zhang, H. D. y Yin, H. L. (2013). Advances in three-dimensional nanofibrous macrostructures via electrospinning. *Progress in Polymer Science*, 39, 862-890.

Sureeporn Koombhongse, W. D. (2001). Flat polymer ribbons and other shapes by

electrospinning. *Journal of Polymer Science*, 39(21), 2598-2606.

Thompson, C. J., Chase, G. G., Yarin, A. L. y Reneker, D. H. (2007). Effects of parameters on nanofiber diameter determined from electrospinning model. *Polymer*, 48, 6913-6922.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2014). *Diseño y desarrollo tecnológico de un equipo de electrospinning para la fabricación de nanofibras poliméricas*. Duitama: Autor.

Villarreal-Gómez, L. J., Cornejo-Bravo, J. M., Vera-Graziano, R. y Grande, D. (2015). Electrospinning as a powerful technique for biomedical applications: a critically selected survey. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 26(2), 157-176.