

# RiUPTC

Repositorio Institucional  
UPTC

[repositorio.uptc@uptc.edu.co](mailto:repositorio.uptc@uptc.edu.co)

## DESARROLLO DE UN EQUIPO DE ELECTROHILADO SIN AGUJA PARA PREPARACION DE NANOFIBRAS POLIMERICAS FASE 1.

**Maria Clara Palacios M.<sup>a</sup>, Edwin Yesid Gómez–Pachón,  
Jorge Arturo Torres Pemberti<sup>a</sup>, Efrén de Jesús Muñoz-  
Prieto<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Facultad Duitama, Escuela de Diseño Industrial, Grupo de Investigación Diseño, innovación y Asistencia Técnica de Materiales Avanzados- DITMAV, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama, Boyacá.  
[mariaclarapalacios.mcpm@gmail.com](mailto:mariaclarapalacios.mcpm@gmail.com)

<sup>b</sup> Facultad de Ciencias básicas, Ciencias Químicas o Grupo de Investigación Desarrollo y aplicación de nuevos materiales DANUM, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá.

**Resumen**— El uso de la nanotecnología en la mayoría de los sectores industriales del país es conocido, sin embargo falta explorar y explotar campos de aplicación donde las propiedades fisicoquímicas de las nanofibras puedan agregar un alto valor agregado. Esta diversificación y mayor escalamiento en su aprovechamiento y producción podrían solucionar los problemas económicos y sociales de la región de Boyacá. La preparación de membranas de nanofibras se podría obtener de manera eficiente al desarrollar la tecnología para ese fin.

Por tanto, el objetivo del proyecto es mostrar el desarrollo de nuevas técnicas de procesamiento, con la cual se obtengan membranas con nanofibras de diferentes tipos de polímeros de alta calidad estructural de manera eficiente y productiva. La propuesta tecnológica se desarrolla bajo un riguroso proceso de diseño para que logre generar una propuesta tecnológica de nanofibras poliméricas en comparación con la técnica clásica de electrohilado por solución. De otra parte, este proyecto también tiene como objetivo ajustarse a las necesidades de los investigadores de la UPTC, que vienen trabajando en el electrohilado de diferentes derivados orgánicos de las plantas Como el almidón de papa, de yuca y bagazo de caña. El banco obtenido de este proyecto será diseñado con miras a ser escalado para usos industriales de mediana productividad para la preparación de membranas de nanofibras de celulosa y sus derivados, por lo cual es esperen obtener diferentes productos de registro de propiedad industrial e intelectual.

**Palabras clave**— Diseño, Nanotecnología, Nanofibras, Polímeros, Tecnología,

**Abstract**— The use of nanotechnology in most of the industrial sectors of the country is known, however, it is still necessary to explore and exploit fields of application where the physicochemical properties of nanofibers can add a high added value. This diversification and greater scaling in their use and production could solve the economic and social problems of the Boyacá region. The preparation of nanofiber membranes could be efficiently obtained by developing the technology for that purpose.

Therefore, the objective of the project is to develop new processing techniques, with which nanofibers of different types of polymers of high structural quality are obtained efficiently and productively. The technological proposal will be developed with a rigorous design process so that it can generate a technological proposal to achieve more efficiently the polymer nanofibres in comparison to the classic technique of electrofiling by solution. On the other hand, this project also aims to meet the needs of UPTC researchers, who have been working on the electro-filing of different organic derivatives of plants such as potato starch, cassava and cane bagasse. The bank obtained from this project will be designed to be scaled for industrial uses of medium productivity for the preparation of membranes of cellulose nanofibers and their derivatives, so it is expected to obtain different industrial and intellectual property registration products.

**Keywords**—Design, Nanotechnology, Nanofibres, Polymers, Technology,

## 1) Introducción

Los últimos desarrollos de electrohilado se ha referido a la variación de los tipos de colectores que se pueden utilizar conservando el arquetipo del equipo de electrohilado con aguja (Gómez Pachón, Montiel Campos, Moreno Rendón, & Vera Graziano, 2010). Se han obtenido nanofibras alineadas u orientadas con colectores rotatorios o paralelos (Jayaraman, Kotaki, Zhang, Mo, & Ramakrishna, 2014), y aleatorias con colectores laminares dentro de la membrana que configuran el movimiento según cada colector (sin movimiento o movimiento). Según (Suarez, 2014) el desarrollo de colectores, se ha visto influenciado más por las membranas que se pueden lograr, que por el control del proceso, es decir, por las variables que convergen para una óptima preparación de las nanofibras.

La mayoría de las investigaciones respecto a las técnicas de electrohilado y preparación de nanofibras se han orientado al desarrollo de colectores con nuevas funcionalidades, para la obtención de membranas en tres dimensiones (Zhang & Chang, 2008), alineadas o con mejores propiedades (PAN & Chao, 2008). Sin embargo la eficacia en la técnica de preparación de nanofibras no ha sido lo suficientemente desarrollada para hacerla más escalable a nivel industrial para que se obtengan más productividad de nanofibras.

Existen algunas variaciones de la técnica del electrohilado de aguja, como modificaciones del tipo de inyector y/o múltiples inyectores, desarrollo de inyección coaxial (una aguja dentro de otra), prevaleciendo siempre la inyección por medio de agujas, por ello a la luz de las nuevas propuestas de equipos donde se hacen otras propuestas para la inyección sin aguja u otros sistemas como esferas, platos rotatorio etc (United States Patente n° US 2014/0051316 A1, 2014). Dentro del tipo de inyección con aguja, se han presentado importantes innovaciones como fueron el electrohilado con aplicación de calor al sistema de inyección directamente a la aguja, conocido como electro melt spinning (Cicero & Dorgan, 2001), las cuales permitían facilitar obtener la viscosidad adecuada del polímero en el momento de ser atraídas por el campo eléctrico, estas técnicas tienen gran relevancia para preparar nanofibras de viscosidad muy alta como la celulosa u otros.

Otras modificaciones importantes al electrohilado por aguja es el conocido como el electrohilado bajo humedad (electro-wet spinning) (Puppi, Piras, Chiellini, & others, 2011), donde el colector es sumergido en disolventes como

etanol, diclorometano, dimetilformamida u otras, dependiendo del tipo de polímero a electrohilar.

Otros desarrollos se refieren a la aplicación de campos magnéticos al espacio intermedio entre la inyección y la colección con el objetivo de hacer modificaciones a las cargas ionizadas dentro del polímero, lo que ha influido a que se preparen nanofibras de polímeros que de otro modo no eran posibles obtenerse antes de que entre se pudiera variar parametros como distancias y velocidades entre ellos. (Dayong, Bo, Yong, & Xingyu, 2007).

Es de notar, que a nivel mundial se viene descubriendo la influencia de diferentes fenómenos físicos en la preparación de nanofibras y desarrollando nuevas tecnologías y técnicas de electrohilado, entre ellas se pueden enumerar el hilado por centrifugado, por esferas, sin aguja como puede verse en la Fig. 1. entre otras (Yarin & Zussman, 2004) (Amalorpava, y otros, 2013) (United States Patente n° US 2011/0156321 A1, 2011). Estas técnicas experimentales al igual que el electrohilado de aguja utilizan la aplicación de altos voltajes, pero el hilado por centrifugado al de agujas en diferentes aspectos como son la geometría y funcionamiento del sistema inyector, así como la forma de los colectores. (United States Patente n° US 2014/0051316 A1, 2014) (United States Patente n° US 2011/0156321 A1, 2011) (Badrossamay, McIlwee, & Goss, 2010).

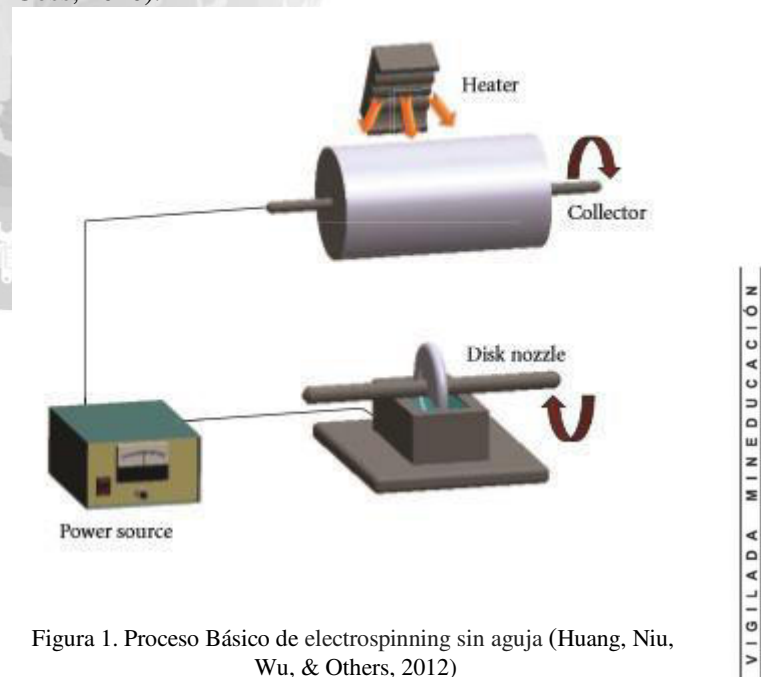


Figura 1. Proceso Básico de electrospinning sin aguja (Huang, Niu, Wu, & Others, 2012)



El proceso de electrohilado sin aguja (needleless electrospinning) puede llegar a ser una manera efectiva de producción de nanofibras, implicando el estiramiento de un fluido polimérico bajo un campo eléctrico, para depositarlas sobre un colector formando un tejido, normalmente estas fibras tienen una superficie lisa dependiendo de la estructura de la hilera. Recientemente el electrohilado sin aguja, ha surgido como una solución prometedora para mejorar la productividad de las nanofibras. Algunos estudios indican para este método diferentes colectores y tipos hileras giratorias como: Hilera de bolas, hilera de disco, hilera de cilindro e hilera espiral como puede verse en la Fig. 2. En donde se encuentra que la hilera de disco forma un campo eléctrico de mayor intensidad teniendo un mejor rendimiento en comparación a la hilera de cilindro. Ese mismo estudio indica que la hilera con forma de espiral tiene mayor tasa de producción de fibras y un mejor control morfológico de la fibra comparada con las hileras de disco y cilindro (Badrossamay, McIlwee, & Goss, 2010).

Debido a que el proceso de hilado sin aguja presenta un principio físico similar al de electrohilado con aguja y una variación significativa respecto al sistema de inyección, se presenta inicialmente el principio físico del electrohilado por aguja, para posteriormente referir al principio del hilado por centrifugado. Para el inicio del proceso, el polímero debe estar diluido en el o los disolventes que permitan una dilución completa del mismo (debe ser completa, para evitar taponamiento del capilar durante el proceso) pero que a la vez promuevan la obtención de fibras homogéneas.

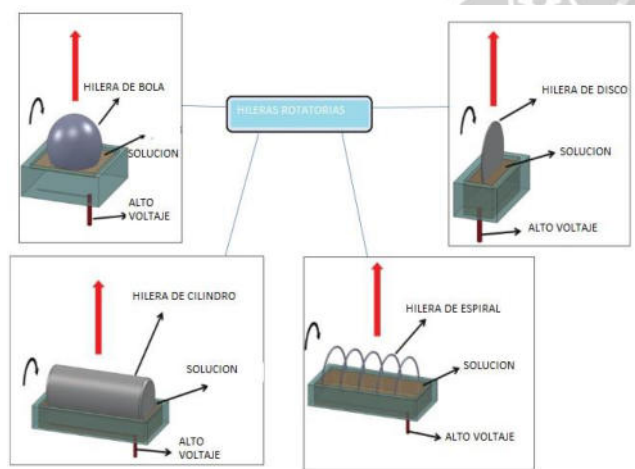


Figura 2. Resumen esquemático de las hileras giratorias sin aguja (Lin, Wang, & Niu, 2010)

Los polímeros son dieléctricos, en presencia de un campo eléctrico pueden considerarse como un arreglo de dipolos eléctricos microscópicos compuestos por cargas positivas y negativas cuyos centros no coinciden perfectamente, se mantienen en su lugar por acción de las fuerzas atómicas y moleculares, y solo pueden cambiar su posición ligeramente en respuesta a fuertes campos eléctricos externos, lo que explica por qué ocurre el estiramiento de la solución en el proceso.

La fuerza del campo eléctrico supera las fuerzas de cohesión de la solución, en la mayoría de los casos dominada por la tensión superficial, es así como un chorro de solución de polímero inicia un viaje desde la punta del capilar hasta el plato colector; en su viaje, el chorro de solución polimérica es alargado debido a las interacciones electrostáticas entre las cargas cercanas a segmentos del mismo chorro, mientras tanto, el disolvente se evapora, finalmente, las fibras se solidifican a su llegada al plato colector. Algunos factores que presentan una influencia en las propiedades finales de la nanofibras preparada por la técnica de electrohilado por aguja son: Parámetros de la solución, concentración de la solución, tensión superficial, conductividad de la solución, efecto dieléctrico del disolvente, voltaje, flujo de salida, distancia entre la punta de la aguja, el plato colector y parámetros ambientales. (Doshi & Reneker, 1995).

Las nanofibras se incluyen en una categoría especial debido a sus funcionalidades y cualidades únicas debido a una larga área de superficie activa (Frenot & Chronakis, 2003). Las tecnologías del proceso para preparar nanofibras a partir de polímeros sintéticos y naturales incluyen electrohilado, síntesis templada, síntesis en plantilla, separación de fases, hilado de compuestos, y fusión-soplado modificado (Jayaraman, Kotaki, Zhang, Mo, & Ramakrishna, Recent advances in polymer nanofibers, 2004) (Barnes, Sell, Boland, Simpson, & Bowlin, 2007).

## 2) Método.

Este proyecto de investigación se basa en un concepto teórico-experimental donde se integraran los saberes de ingeniería electromecánica (diseño de elementos mecánicos, electrónicos, eléctricos y de programación), Química (con el conocimiento profundo del

comportamiento y la disolución de los polímeros) y el Diseño industrial, la cual liderará el proceso de análisis de soluciones, planteamientos creativos y experimentales de los mecanismos esenciales el desarrollo Tecnológico y consideraciones de interacción hombre-máquina. En esta interdisciplinariedad, interactúan el posgrado de Ciencias Químicas y los pregrados de Diseño industrial e Ingeniería electromecánica. Para esta integración de disciplinas se requiere trabajar de forma organizada, para lo cual el eje central de desarrollo de la tecnología será usar el método de Diseño axiomático, con el fin de garantizar desarrollar diseños innovadores, creativos, funcionales y que permita la viabilidad técnica y económica.

El diseño axiomático es una metodología de diseño de sistemas que utiliza métodos matriciales para analizar sistemáticamente la transformación de las necesidades de los clientes en requisitos funcionales, parámetros de diseño y variables de proceso.

### 3) *Desarrollo del trabajo.*

- INVESTIGACION PRELIMINAR

Se comienza con una validación del estado del arte en los temas de técnicas de preparación de micro y nanofibras poliméricas, métodos de preparación, características de la técnica de electrohilado con base en que la universidad cuenta con dos equipos como el de aguja vertical – horizontal y el equipo de centrifugado para la disposición de pruebas y prácticas que sean necesarias durante la investigación.

Teniendo en cuenta la información encontrada empezamos a establecer las necesidades del banco experimental como lo son tamaños, velocidades, distancias, materiales, esto con el fin de llegar a una idea cercana de lo que se va a llegar a ser.

- FASE DE DISEÑO

En la fase de diseño es importante tener en cuenta los tipos de procesos a utilizar, parámetros de la composición y fenómenos físicos involucrados para el banco experimental. Para llegar a la generación de requerimientos para la validación del banco experimental para evaluar las propuestas de Diseño óptimas de acuerdo al objetivo planteado inicialmente y los requerimientos establecidos. En esta fase también es importante el desarrollo de cálculos de ingeniería por medio de generación de modelos, cálculos y simulaciones necesarias para la estructura de control de secuencias para asegurar la funcionalidad y la seguridad que debe presentar el equipo.

- FASE DE DESARROLLO

Después de tener contemplados los parámetros de diseño se continúa con la fase de construcción se tienen en cuenta los parámetros de distancias hilera - colector, velocidades de rotación, intensidades de campos y cantidad de solventes, y requerimientos de uso, funcionales, ergonómicos y técnico productivos, establecidos desde el inicio y así responder al objetivo general propuesto, el ajuste del equipo para manufacturar los mecanismos estructurales de integración y control del sistema. Para efectuar la evaluación del sistema del banco experimental de electrohilado sin aguja.

- DOCUMENTACION

Documentación final que pretende evidenciar el nuevo conocimiento adquirido a través del proceso seguido en el proyecto.

### 4) *Resultados.*

- Funcionamiento del banco experimental de electrohilado por el método sin aguja para la preparación de fibras poliméricas de PLA.
- Muestras electrohiladas de microfibras de PLA bajo diferentes parámetros de distancias y velocidades entre colector e hilera giratoria del banco de pruebas.

### 5) *Discusión*

Existen diferentes procesos para preparar nanofibras, pero el que más se ha destacado en los últimos años es la técnica del proceso del electrohilado de solución (de aguja) a nivel de laboratorio debido a sus ventajas en la fabricación de las nanofibras poliméricas de origen sintético y/o natural y en el control de sus parámetros (Gómez Pachón, Montiel Campos, Moreno Rendón, & Vera Graziano, 2010) (Jayaraman, Kotaki, Zhang, Mo, & Ramakrishna, 2014). Hasta hace unos pocos años, el proceso del electrohilado con inyector de aguja, era quizás el único método que podría generar nanofibras continuas. Sin embargo, no se ha podido implementar a nivel industrial debido a sus grandes limitaciones, como baja productividad, lo cual lo hacen muy ineficiente para obtener un volumen alto de material. Por tanto, el consumo energético del equipo llega a ser alto debido a la baja productividad de las nanofibras. Por otra parte, las características del proceso limitan la obtención de nanofibras de algunos polímeros debido a que usa



únicamente la aplicación de fenómenos eléctricos (Barnes, Sell, Boland, Simpson, & Bowlin, 2007), también varios estudios evidencian dificultades para controlar adecuadamente el diámetro de las nanofibras y del tamaño de los poros (Baji, Mai, Wong, & Chen, 2010).

Por otra parte, todavía está en investigación el electrohilado de nuevos tipos de polímeros (Kong & Ziegler, 2013). Una variación de la técnica tradicional del electrohilado, es denominado electrohilado por centrifugado “centrifugal spinning” Sin embargo con este método la única forma del colector en forma de casquete, se generan entonces fibras depositadas al azar, con un problema de control de las características de las nanofibras, debido entre otros factores a la rápida evaporación del solvente.

Por tanto, se han venido desarrollando en el mundo tecnologías experimentales relacionadas con el electrohilado, que usan diferentes configuraciones de los inyectores, combinan diferentes fenómenos físicos como altas rotaciones, aplicación de campos magnéticos, inyección sin agujas, aprovechamiento del comportamiento viscoso de los polímeros, entre otras técnicas.

Se encontró a partir de una revisión del estado del arte, que el hilado sin aguja (needleless spinning) es una técnica que está en fase experimental, con la cual se puede mejorar el nivel de productividad y la eficiencia producto-energía de nanofibras debido a la múltiple inyección del polímero (Yarin & Zussman, 2004). Este proceso experimental combina tres fenómenos físicos (eléctricos, mecánicos e hidráulicos), por lo cual sería imprescindible conocer como afectarían estos parámetros en las propiedades estructurales de las nanofibras, lo cual es fundamental para el diseño de membranas y sus potenciales aplicaciones industriales.

## 6) Conclusión.

Aunque ya existen algunos desarrollos de equipo de electrohilado sin aguja en el mundo como (Yarin & Zussman, 2004) aún son pocas las universidades, centros de investigación o empresas privadas que hayan trabajado, desarrollado y documentado este tipo de tecnología, por tanto son pocas las fuentes donde se haga referencia de esta clase de equipos para poder hacer un ejercicio de investigación, recopilación y estudio del estado del arte

exhaustivo y completo; lo que supone un punto de partida a manera de investigación experimental.

El desarrollo de equipos de capacidad industrial para preparar nanofibras poliméricas en Colombia es muy incipiente ó inexistente por lo que limita los tipos de investigación y desarrollo tecnológico que se pretende desarrollar con estos tipos de materiales, lo cual lleva también a que no se aproveche todo el potencial de los polímeros naturales y artificiales, condenando al atraso científico, social y económico de nuestra región.

## 7) Referencias.

- Badrossamay, M., McIlwee, H., & Goss, J. (2010). Nanofiber assembly by rotary jet-spinning. *Nano Letters*, 2257-2261.
- Baji, A., Mai, Y. W., Wong, S. C., & Chen, P. (2010). Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties. *Composites Science and Technology*, 703-718.
- Barnes, C., Sell, S., Boland, E., Simpson, D., & Bowlin, G. (2007). Nanofiber technology: designing the next generation of tissue engineering scaffolds. *Adv Drug Deliv Rev*, 1413-33.
- Cicero, J. A., & Dorgan, J. R. (2001). Physical Properties and fiber morphology of poly(lactic acid) Obtained from continuous Two-Step Melt Spinning. *Journal of Polymers and the Environment*, 1-10.
- Dayong, Y., Bo, L., Yong, Z., & Xingyu, J. (2007). Fabrication of Aligned Fibrous Arrays by Magnetic Electrospinning. *Adv. Matter.*, 19: 3702-3706.
- Doshi, J., & Reneker, D. (1995). Electrospinning process and application of electrospun fibers. *J. Electrostatics*, 151-160.
- Frenot, A., & Chronakis, I. (2003). Polymer nanofibers assembled by electrospinning. *Current opinion in Colloid & Interface Science*, 64-75.
- Gómez Pachón, E., Montiel Campos, R., Moreno Rendón, E., & Vera Graziano, R. (2010). Diseño de un equipo para la fabricación de andamios de nanofibras para aplicaciones biomédicas. *Memorias del XV Congreso Internacional Anual SOMIM*, 1-10.

Jayaraman , K., Kotaki , M., Zhang , Y., Mo, X., & Ramakrishna, S. (2014). Recent advances in polymer nanofibers. *J Nanosci Nanotechnology*, 52-65.

PAN, & Chao. (2008). Electrospinning of continuous, Large Area, Latticework Fiber onto Two-Dimensional Pin-array Collectors . *Journal of Macromolecular Science*, 735-742.

Puppi, D., Piras, A., Chiellini, F., & others. (2011). Optimized electro and wet spinning techniques for the production of polymeric fibrous scaffolds loaded with biphosphonate and hydroxyapatite. *J Tissue Eng Regen Med*, 253-263.

Smit, A., & Douglas Sanderson , R. (30 de Jun de 2011). *United States Patente n° US 2011/0156321 A1*.

Suarez, B. X. (2014). Diseño de un sistema de posicionamiento y colección para el equipo de electrohilado. Duitama .

Kong, L., & Ziegler, G. R. (2013). Quantitative relationship between electrospinning parameters and starch fiber diameter. *Carbohydrate Polymers*, 92, 1416-1422.

Yarin, A., & Zussman , E. (2004). Upward needless electrospinning of multiple nanofibers . *Polymer* 45, 2977-2980.

Zhang , M., Cooper, A., & Edmondson, D. (2014). *United States Patente n° US 2014/0051316 A1*.

Zhang, D., & Chang , J. (2008). Electrospinning of three dimensional nanofibers tubes with controllable architectures . *ACS Publications*, 3283-3287.