



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Tecnológico Nacional de México

Campus Querétaro

GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOFIBRAS 3D OBTENIDAS POR UN EQUIPO AUTOMATIZADO DE ELECTROHILADO DE CAMPO CERCANO CON COLECTOR TIPO ALFILER

Que para obtener el Grado de:
MAESTRO EN INGENIERÍA

presenta

JUAN ALONSO DE LA ROSA GATICA

Dirigida por:

Director: Dr. Carlos Velasco Santos
Codirector: Dr. Nimrod Vázquez Nava
Asesor: Dra. Ana Laura Martínez Hernández

Noviembre, 2021



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Querétaro
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Querétaro, Qro. **15/octubre/2021**
Oficio No. DEPI/254/2021

JUAN ALONSO DE LA ROSA GATICA
ESTUDIANTE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
PRESENTE

De acuerdo con el Reglamento para Exámenes Profesionales de la Dirección General de Educación Superior Tecnológica, se le autoriza la impresión de la Tesis, para obtener el Grado de MAESTRÍA EN INGENIERÍA, titulada:

"GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOFIBRAS 3D OBTENIDAS POR UN EQUIPO AUTOMATIZADO DE ELECTROFILADO DE CAMPO CERCANO CON COLECTOR TIPO ALFILER"

Para el correspondiente Examen de Grado.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"La tierra será, como sean los hombres"

GABRIELA PINEDA CHACÓN
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Coordinación de Maestría
Archivo

Jany*



Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo, Col. Centro, C.P. 76000,
Querétaro, Qro.
Plantel Centro tel. 01(442) 2274400 ext. 4421
Plantel Norte tel. 01(442) 2435554
e-mail: depin@queretaro.tecnm.mx
tecnm.mx | queretaro.edu.mx





Querétaro, Qro. **15/octubre/2021**
Oficio No. DEPI/258/2021

A QUIEN CORRESPONDA:

Por medio de la presente se hace constar que el trabajo de tesis con título: **“GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOFIBRAS 3D OBTENIDAS POR UN EQUIPO AUTOMATIZADO DE ELECTROHILADO DE CAMPO CERCANO CON COLECTOR TIPO ALFILER”**; ha sido revisado por medio de la herramienta de software TURNITIN, cuyo resultado se anexa a la presente y **no se ha encontrado evidencias de plagio en su realización**. El autor de dicho trabajo, estudiante de **Maestría en Ingeniería, Juan Alonso de la Rosa Gatica**, es el responsable de la autenticidad y originalidad del mismo y; manifiesta que para su desarrollo ha utilizado diversas citas para su soporte, mismas que han sido marcadas a lo largo del mismo y listadas al final como REFERENCIAS bibliográficas.

Se extiende la presente para la continuación del proceso de obtención del grado de Maestría en Ingeniería, y a petición del interesado.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
“la tierra será como sean los hombres”*

GABRIELA PINEDA CHACÓN
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.c.p. Coordinación de maestría
Archivo

Jany*



Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo, Col. Centro, C.P. 76000,
Querétaro, Qro.
Plantel Centro tel. 01(442) 2274400 ext. 4421
Plantel Norte tel. 01(442) 2435554
e-mail: depin@queretaro.tecnm.mx
tecnm.mx | queretaro.edu.mx



Santiago de Querétaro, Qro. 18 de noviembre de 2021.

El que suscribe, egresado de MAESTRÍA EN INGENIERÍA; de manera libre y voluntaria autorizo al Centro de Información del Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro a difundir la obra de mi autoría con el Título del trabajo GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOFIBRAS 3D OBTENIDAS POR UN EQUIPO AUTOMATIZADO DE ELECTROHILADO DE CAMPO CERCANO CON COLECTOR TIPO ALFILER. Para fines académicos, científicos y tecnológicos, mediante formato CD-ROM o digital, desde Internet, Intranet y en general cualquier formato conocido o por conocer.

Dicha obra estará disponible al estudiantado de esta Institución a partir del 18 de noviembre de 2021, fecha en la cual se puede difundir la obra.

Postulante: JUAN ALONSO DE LA ROSA GATICA

No. de Control: M19141436

Correo electrónico: alonsodelarosa.1994@gmail.com

Título de la obra: GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOFIBRAS 3D OBTENIDAS POR UN EQUIPO AUTOMATIZADO DE ELECTROHILADO DE CAMPO CERCANO CON COLECTOR TIPO ALFILER.

Área del conocimiento: MATERIALES Y NANOTECNOLOGÍA.

Palabras clave de la obra: ELETROHILADO CAMPO CERCANO, NYLON 66, 3D MULTICAPAS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.



DE LA ROSA GATICA JUAN ALONSO

1. Índice general

1. Índice general.....	I
2. Índice de figuras.....	IV
3. Índice de tablas.....	VI
4. Acrónimos.....	VIII
5. Agradecimientos.....	IX
6. Dedicatorias.....	IX
7. Resumen.....	X
8. Abstract.....	XI
9. Introducción.....	1
10. Marco teórico.....	3
10.1 Técnica de electrohilado.....	3
10.2 Principios de funcionamiento.....	4
10.3 Parámetros en el proceso de electrohilado.....	6
10.4 Fibras poliméricas de escala nanométricas.....	9
10.5 Forma, estructura y textura superficial.....	9
10.6 Estructura 3D en nanofibras.....	12
10.7 Propiedades de las fibras.....	12
10.7.1 Propiedades mecánicas.....	13
10.8 Múltiples chorros-Producción en masa.....	13
10.9 Nylon 6,6.....	13
10.10 Solventes.....	14
10.10.1 Ácido fórmico.....	15
10.11 Carga eléctrica.....	15
10.12 Ley de Coulomb.....	15
10.13 Campo eléctrico.....	16
10.14 Líneas de campo eléctrico.....	16

10.15	Permitividad eléctrica	16
10.16	Constante dieléctrica o permitividad relativa	16
10.17	Rigidez dieléctrica o Resistencia dieléctrica.....	17
10.17.1	Rigidez dieléctrica del aire	17
10.18	Porcentaje en masa wt%	17
10.19	Técnicas de caracterización	18
10.19.1	Microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés)	18
10.19.2	Espectroscopía Infrarroja.....	18
10.20	Softwares.....	19
10.20.1	OpenBuilds CONTROL v1.0.295.....	19
10.20.2	Arduino (IDE)	19
10.20.3	AutoCAD ®.....	19
10.20.4	SolidWorks ®	19
10.20.5	COMSOL Multiphysics ®	20
10.21	Equipamiento complementario	20
10.21.1	Fuente de alto voltaje	20
10.21.2	Bomba de infusión KDScientific 100	20
11.	Estado del arte (Antecedentes).....	21
12.	Metodología	25
12.1	Diseño y construcción mecánica de la carcasa del sistema de electrohilado	25
12.2	Diseño e instalación de los circuitos eléctrico y electrónico para el control del sistema de electrohilado.....	42
12.3	Sensor de contacto o final de carrera	49
12.4	Control de encendido y apagado de Fuente de Alto Voltaje	50
12.5	Instrumentación y control.....	51
12.6	Materiales y equipo.....	52
12.7	Preparación de la solución	52

12.8	Procedimiento experimental	52
12.9	Diseño de experimento (DDE).....	53
12.10	Técnicas de caracterización	55
13.	Resultados.....	56
13.1	Análisis de campo eléctrico en COMSOL Multiphysics	56
13.2	Imágenes fotográficas	59
13.3	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM por sus siglas en inglés)	59
13.4	Diseño de Experimentos.....	66
13.4.1	Diseño Factorial 3^2	66
13.5	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	70
14.	Conclusiones generales	75
15.	Referencias bibliográficas	77
16.	ANEXO A.....	80
17.	ANEXO B.....	94
18.	ANEXO C.....	99
19.	ANEXO D.....	102

2. Índice de figuras

Figura 1: Esquema del proceso de electrohilado. Adaptado de (You, y otros, 2017)	4
Figura 2: Ilustración esquemática de (a) electrohilado de campo lejano y (b) procesos de electro-escritura de campo cercano, que producen (c) nanofibras aleatorias y (d) alineadas, respectivamente. Adaptado de (Xu, y otros, 2014)	4
Figura 3: Proceso de fibra PVDF de electrohilado de campo cercano. Adapta de (Liu, Pan, Lin, & Lai, 2013).	5
Figura 4: Chorro de polímero saliendo del cono de Taylor.	6
Figura 5: Montaje experimental del proceso CNFES. Adaptado de (Cheng-Tang , y otros, 2014).....	7
Figura 6: Secciones transversales de fibras representativas de poliestireno electrohilado (PS) a diferentes concentraciones y distintos disolventes.....	10
Figura 7: Ilustración de apilamiento de las mallas capa por capa para formar una construcción 3D. Adaptado de (Feng Li, y otros, 2018).....	12
Figura 8: Fórmula química del Nylon 6,6 y esquema de síntesis.	14
Figura 9: Vista isométrica del ensamble del equipo de ES.	25
Figura 10: Vista frontal del ensamble del equipo de ES.	26
Figura 11: Vista lateral del ensamble del equipo de ES.....	26
Figura 12: geometría de estudio para simulación de campo eléctrico.....	56
Figura 13: potencial eléctrico (V) y campo eléctrico entre hilador y colector tipo alfiler.	57
Figura 14: Potencial eléctrico (V) y líneas de campo eléctrico entre hilador y colector tipo plano.	57
Figura 15: curva de nivel: campo eléctrico (V/m), configuración con colector tipo alfiler.	58
Figura 16: curvas de nivel de campo eléctrico (V/m) de la configuración de electrohilado de campo cercano con colector tipo plato o plano.	58
Figura 17: fotografías de películas electrohiladas a 1500 V y 60 mms ⁻¹ , (a) una capas, (b) dos capas y (c) cinco capas.....	59
Figura 18: imagen SEM de película IIB.	60
Figura 19: Morfología de las fibras de Nylon 6,6 electrohiladas obtenidas por configuración propuesta de electrohilado de campo cercano, magnificación X100.....	61
Figura 20: Características morfológicas de película electrohilada a 1700 V, 50 mm/s, 0.01 mL/h, 29G, 3mm de distancia de trabajo y 4 g Nylon 6,6/ 20 g ácido fórmico.	62
Figura 21: Características morfológicas de película electrohilada a 1900 V, 60 mm/s, 0.01 mL/h, 29G, 3mm de distancia de trabajo y 4 g Nylon 6,6/ 20 g ácido fórmico.	62

Figura 22: imágenes SEM de los 9 tratamientos realizados a magnificación x1.0 k.....	63
Figura 23: Morfología de las fibras de Nylon 6,6 electrohiladas obtenidas por configuración propuesta de electrohilado de campo cercano, magnificación X10,000.....	64
Figura 24: características morfológicas de película electrohilada IIB (izquierda) y IIC (derecha), ambas a 0.01 mL/h, 29G, 3mm de distancia de trabajo y 4 g Nylon 6,6/ 20 g ácido fórmico.	65
Figura 25: diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	68
Figura 26: Gráficas de residuos para el diámetros de las fibras electrohiladas.	69
Figura 27: Espectros FTIR de las películas electrohiladas de Nylon 6,6.....	70
Figura 28: Espectros FTIR y picos principales de las películas electrohiladas de Nylon 6,6..	72
Figura 29: Sección aumentada de espectros IR en la región de 1250 a 1150 cm^{-1} y 950 a 920 cm^{-1} de las muestras electrohiladas.....	72
Figura 30: espectros FTIR conforme a tensión eléctrica y velocidad de desplazamiento.....	73
Figura 31: Sección aumentada en la región de 1680 a 1500 cm^{-1} de espectros FTIR de películas electrohiladas de Nylon 6,6.....	74

3. Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros de electrohilado y su influencia en la morfología de las fibras.....	7
Tabla 2: tipos de estructuras de fibras electrohiladas.	11
Tabla 3: especificaciones de ácido fórmico.	15
Tabla 4: especificaciones KDSscientific 100.	20
Tabla 5: Comparativa entre configuraciones experimentales NFES.	23
Tabla 6: revisión sistemática de parámetros de operación y configuraciones experimentales (antecedentes).....	24
Tabla 7: pieza maquinada Pata soporte frontal derecha PS-2A.	27
Tabla 8: pieza maquinada Pata soporte posterior derecha PS-2B.	28
Tabla 9: pieza maquinada Pata soporte frontal izquierda PS-2C.	29
Tabla 10: pieza maquinada Pata soporte posterior izquierda PS-2D.	30
Tabla 11: pieza maquinada Placa lateral derecha PL-D.	31
Tabla 12: pieza maquinada Placa lateral izquierda PL-I.	32
Tabla 13: pieza maquinada Placa frontal del eje Y PF-Y.	33
Tabla 14: pieza maquinada Placa posterior del eje Y PP-Y.	34
Tabla 15: pieza maquinada Placa superior del eje z (PS-Z).	35
Tabla 16: pieza maquinada Placa inferior del eje z (PI-Z).	36
Tabla 17: pieza maquinada Placa base cama PBC.	37
Tabla 18: proceso de armado de la carcasa del equipo de electrohilado de campo cercano.	38
Tabla 19: metodología para la instalación eléctrica y electrónica del sistema de electrohilado.	42
Tabla 20: parámetros de operación constantes en el proceso de electrohilado.	52
Tabla 21: nomenclatura, niveles y tratamiento de la experimentación.	53
Tabla 22: factores de estudio y variables de control.	55
Tabla 23: nomenclatura de películas electrohiladas de 5 capas, datos de temperatura y humedad.....	59
Tabla 24: diámetros promedios de fibras electrohiladas obtenidas.	60
Tabla 25: porcentaje de área de fibras y diámetros promedios.	65
Tabla 26: Datos experimentales utilizados en Diseño Factorial 3 ²	66
Tabla 27: factores de estudios y sus niveles.	66
Tabla 28: análisis de varianza.....	67
Tabla 29: resumen del modelo para Analizar diseño de superficie de respuesta.	67
Tabla 30: ecuación de regresión.....	67

Tabla 31: picos principales observados en las películas electrohiladas.....71

4. Acrónimos

1. TES: electrohilado tradicional (Traditional Electrospinning en inglés).
2. NFES: electrohilado de campo cercano (Near Field Electrospinning en inglés).
3. LV-NFES: electrohilado de campo cercano de bajo voltaje (Low Voltage Near Field Electrospinning en inglés).
4. NYLON 6,6: poliamida 6,6 o Nylon 6,6.
5. AF: ácido fórmico.
6. CA: corriente alterna.
7. CD: corriente directa.
8. DIP: se trata de un conjunto de interruptores eléctricos que se presenta en un formato encapsulado.

5. Agradecimientos

Dir. Dr. Carlos Velasco Santos- Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Querétaro.

Co. Dir. Dr. Nimrod Vázquez Nava- Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Celaya.

Ases. Dra. Ana Laura Martínez Hernández- Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Querétaro.

Dr. Miguel de la Luz Asunción y Dr. Eduardo E. Pérez Ramírez del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Querétaro.

Dra. Marina Vega Gonzáles del Centro de Geociencias – UNAM campus Juriquilla

Mtro. Francisco Fernández por su asistencia en el manejo de la fuente de alto voltaje.

6. Dedicatorias

Especialmente a mis padres Alonso y Mónica que me apoyaron en muchos aspectos a lo largo del curso de Maestría, gracias al apoyo he logrado alcanzar otro nivel más en mi preparación académica.

A mis hermanas Paulina y Paola por sus buenos consejos.

7. Resumen

Electrohilado de campo cercano es una variante del electrohilado tradicional que desde 2006 ha ganado interés en la comunidad científica, ya que es un proceso capaz de producir películas poliméricas 3D tejidas mediante el apilamiento de capa por capa de películas 2D hechas de nanofibras. Las películas tejidas electrohiladas han mostrado una mejora en las propiedades eléctricas, capacitivas y de adaptación celular en comparación con las películas no tejidas. Estas propiedades se logran al estar asociadas a las características morfológicas y estructurales de películas electrohiladas con patrones complejos o alineados y un paso entre fibras deseado. Estas características han sido posibles realizarlas aprovechando la zona de estabilidad del chorro de polímero en el proceso de electrohilado, el cual es posible de alcanzar al trabajar con tensiones y distancias de trabajo relativamente bajas. Las propiedades mencionadas anteriormente permiten cumplir con un mayor potencial en aplicaciones como la ingeniería de tejidos, el almacenamiento de energía y la electrónica flexible. Esta investigación estudia las propiedades de las películas electrohiladas 3D de Nylon 6,6 obtenidas mediante el diseño y construcción de una configuración experimental de un equipo de electrohilado de campo cercano con colector tipo alfiler. En esta configuración, el hilador, que contiene la solución polimérica, está cargado positivamente y el colector tipo alfiler está conectado al negativo de la fuente de alto voltaje, dichos elementos se mueven en las direcciones X-Y y se disponen de manera colineal uno con respecto al otro, mientras que el sustrato aislado de silicio se mantiene estacionario. Esta disposición está diseñada con el objetivo de manipular el campo eléctrico y reducir las inestabilidades asociadas al proceso. Se trabaja con Nylon 6,6 por su resistencia que desarrolla al estirar y su excelente resistencia al desgaste. Los niveles de tensión eléctrica son inferiores a los 3 kV y la distancia de trabajo de 3 mm. La morfología de las fibras se estudia mediante microscopía electrónica de barrido y las características de la estructura química mediante espectroscopía infrarroja. Se analizan parámetros como el voltaje y la velocidad de avance para analizar experimentalmente sus efectos sobre el control en la deposición de fibras. Los resultados experimentales muestran que se pueden obtener películas electrohiladas 3D de hasta 15 capas mediante el apilamiento capa por capa de fibras continuas, cuyas características estructurales dependen de los parámetros de síntesis, permitiendo de esta forma la diversificación de los materiales obtenidos por esta técnica.

Palabras clave: Electrohilado de campo cercano, diseño y construcción, Nylon 6,6, multicapas, nanofibras

8. [Abstract](#)

Near field electrospinning is a variant of traditional electrospinning that since 2006 has gained interest in the scientific community as it is a process capable of producing woven 3D polymeric films by layer-by-layer stacking of 2D films made of nanofibers. Woven electrospun films have shown improvement in electrical properties, capacitance and cell-adaptive properties compared to non-woven films. These properties are achieved by being associated with the morphological and structural characteristics of electrospun films with complex or aligned patterns and a desired pitch between fibers, these characteristics have been possible by taking advantage of the stability zone of the polymer jet in the electrospinning process by work with relatively short voltages and working distances; The properties mentioned above allow it to fulfill greater potential in applications such as tissue engineering, energy storage and flexible electronics. This research studies the properties of Nylon 6,6 3D electrospun nanofiber films obtained by a designed, constructed and, experimental setup of near field electrospinning equipment with a needle collector. In this configuration the spinner, which contains the polymeric solution is positively charged, and the pin collector is connected to the negative of the high voltage source, which move in the XY directions and are arranged in a collinear manner with respect to the another, while the isolated silicon wafer substrate is kept stationary, this arrangement is designed with the objective of manipulating the electric field and reducing instabilities associated with the process. It works with Nylon 66 for its resistance provided by the structures that develop when stretching and its excellent resistance to wear. The electrical voltage levels are less than 3 kV and the working distance of 3 mm. The fibers morphology is studied by scanning electron microscopy and chemical structure features by infrared spectroscopy. Parameters such as voltage and forward speed are analyzed to experimentally study their effects on the control of fiber deposition. The experimental results show that continuous and repeatable fibers can be obtained which structure features are depending on parameters of synthesis, allowing in this way diversification of materials obtained by this technique.

Keywords: Near Field Electrospinning, design and construction, Nylon 6,6, Multi-layer, Nanofibers

9. Introducción

Hoy en día, el electrohilado como método simple, eficaz y versátil para producir fibras ultrafinas continuas ha atraído mucho interés en la preparación de diversos materiales funcionales. Gracias a las ventajas de la gran relación superficie-volumen de las fibras hiladas y la alta porosidad de las mismas, las fibras y mallas electrohiladas han mostrado aplicaciones potenciales en varios campos como nanosensores, filtraciones y apósitos para heridas (Zhang, y otros, 2020).

Técnicamente, el electrohilado es un proceso que utiliza un fuerte campo eléctrico para extraer una solución de polímero o fundirla en finos filamentos. La configuración básica de electrohilado o electrohilado tradicional (TES por sus siglas en inglés) consiste en una hilera de boquilla simple donde las fibras producidas se depositan en un colector plano a una tasa de producción muy baja (menos de 0.3 gh^{-1}) en una orientación aleatoria. Estos tipos de sistemas tienen la característica de ser susceptibles a inestabilidades en el chorro o jet, estas inestabilidades traen como consecuencia aspectos que limitan a la red electrohilada cumplir con ciertas aplicaciones; este fenómeno se debe a que las fibras están cargadas eléctricamente y están sujetas a las fuerzas de Lorentz (Nedjari, y otros, 2015), a su vez se ven afectadas por campos repulsivos por parte de las fibras ya depositadas en el colector (Brown, y otros, 2014). Otro parámetro que contribuye a las inestabilidades es la distancia de trabajo, mientras esta se mayor más inestabilidad experimentará el proceso de electrohilado debido a una menor fuerza de atracción hacia el colector, ya que se encuentran en presencia de un campo eléctrico, la fuerza de atracción de las fibras se describirá de acuerdo a la Ley de Coulomb.

A la fecha, gran número de investigadores se han sumado al continuo esfuerzo por ampliar las capacidades de electrohilado, estas investigaciones se centran en proponer configuraciones experimentales entre los elementos del sistema, esto con el objeto de obtener fibras con características específicas en cuanto a morfología, propiedades piezoeléctricas, capacitivas, estructurales, entre otros. Existen diversas variantes a la técnica de electrohilado, tanto experimentales como ya colocadas en el mercado, como son el electrohilado coaxial, por fundición y aquellos que se distinguen por la forma del colector, por mencionar algunos. Sin embargo, estos métodos permiten hasta cierto punto el posicionamiento directo y controlado de la deposición de nanofibras, lo cual le atribuye ciertas propiedades morfológicas que potencializan las respuestas piezoeléctricas, capacitivas, conductivas, fotoeléctricas, celularmente adaptativa, entre otras; lo cual amplía claramente sus áreas de aplicaciones. La

alineación de nanofibras durante el proceso de electrohilado es un desafío debido a las fuerzas externas aplicadas por el campo eléctrico y la carga positiva transportada dentro del propio polímero (Padmanabhan, Kamaraj, Magwood Jr., & Starly, 2011), como se mencionó anteriormente. Una de las variantes a la técnica de electrohilado presentada en 2006 por Sun y otros es aquella conocida como Electrohilado de campo cercano (NFES por sus siglas en inglés) la cual se caracteriza por operar con tensiones eléctricas relativamente bajas (200 a 12,000 V) y distancias de trabajo relativamente cortas, entre 5 a 0.05 cm (You, Ye, & Guo, 2017), es una variante que actualmente continúa en desarrollo debido a que tiene buen control en la deposición controlada de fibras a través de un camino predefinido por movimientos mecánicos en las direcciones XY, sin embargo, algunos autores como He y otros (2017) lo consideran una tecnología con mecanismo inmaduro, lo cual representa un área de estudio.

Mencionado lo anterior, y considerando las exigencias en las propiedades de las nanofibras por parte de las áreas de aplicación, en especial aquellas que requieren de cierto tamaño de entramado 3D de la red hilada o bien un paso entre fibras adecuado, como son Ingeniería de tejidos, biomédica y la industria electrónica por mencionar algunas y, en conjunto con las capacidades actuales de este tipo de sistemas, ha conducido a esta investigación a analizar a través de caracterizaciones las propiedades de las fibras electrohiladas obtenidas a través de una configuración experimental propuesta, enfocándose principalmente en la técnica de campo cercano y bajo voltaje para la deposición controlada de nanofibras de Nylon 6,6 con el fin de conocer la relación directa entre propiedades y parámetros de operación del equipo del electrohilado para definir condiciones de operación óptimas.

10. [Marco teórico](#)

10.1 [Técnica de electrohilado](#)

La idea fundamental del electrohilado data de la década de 1930, cuando se publicó una serie de patentes para describir la configuración experimental para la producción de fibras poliméricas mediante la fuerza electrostática (You, y otros, 2017).

El equipo necesario para el electrohilado a escala de laboratorio es relativamente simple; en la configuración básica hay tres componentes principales: la fuente de alimentación de alto voltaje, una bomba de jeringa y el colector, que puede ser simplemente una lámina de papel de aluminio. En la Figura 1 se muestra un esquema del equipo utilizado para el electrohilado. En esta disposición simple, las fibras se depositan como una esterilla aleatoria. Sin embargo, puede haber disposiciones alternativas, por ejemplo, la compañía neozelandesa Electrospinz produce un aparato elegantemente diseñado que utiliza un tanque de presión constante en lugar de la bomba de jeringa. Una variación interesante del electrohilado de agujas es el electrohilado coaxial, que en algunos casos utiliza dos agujas concéntricas con diferentes diámetros. De esta manera, las fibras se pueden obtener con un núcleo interno que difiere de la parte externa de la fibra (fibras núcleo-cáscara). En general, el diseño de sistemas de electrohilado ha estado sujeto a numerosos avances tecnológicos en los últimos años. (Nedjari, y otros, 2015). Una de las últimas tendencias a la técnica de electrohilado que hasta la fecha se siguen incursionando su estudio, es la técnica de electrohilado de campo cercano (Near Field Electrospinning, NFES por sus siglas en inglés). La técnica de NFES se caracteriza por operar con distancias de trabajo muy pequeñas, las cuales pueden ser de 3 a 0.5 mm y en otros estudios más ambiciosos esta distancia ha llegado a ser de 20 μm como es el estudio de Song y otros (2015). En la Figura 2 se presenta una comparación entre un electrohilado convencional o tradicional contra un electrohilado de campo cercano, siendo la distancia de trabajo y el voltaje los aspectos más distintivos entre estas dos configuraciones. Así mismo Xu y otros (2014) describen que uno de los aspectos negativos del electrohilado convencional es que la fuerza debida al efecto de latigazo genera fibras discontinuas que puede verse reflejadas en las propiedades mecánicas de la red electrohilada.

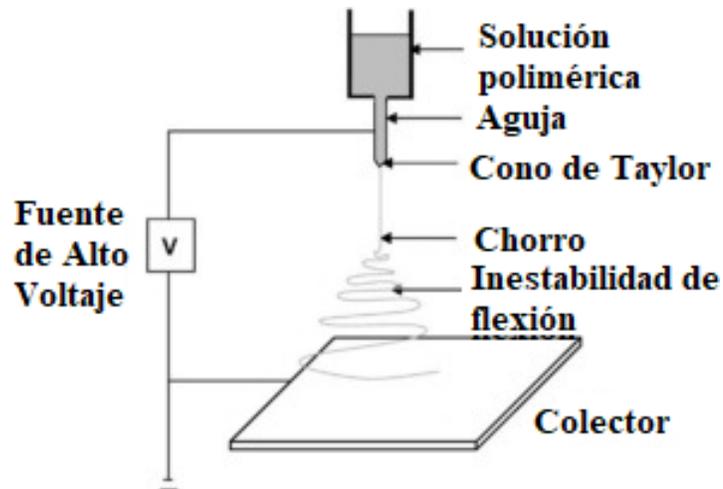


Figura 1: Esquema del proceso de electrohilado. Adaptado de (You, y otros, 2017)

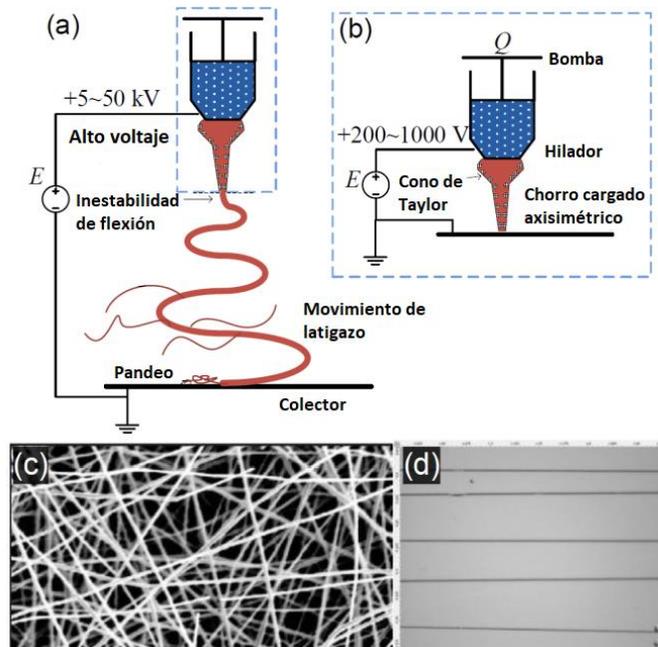


Figura 2: Ilustración esquemática de (a) electrohilado de campo lejano y (b) procesos de electroescritura de campo cercano, que producen (c) nanofibras aleatorias y (d) alineadas, respectivamente.

Adaptado de (Xu, y otros, 2014)

10.2 Principios de funcionamiento

En el electrohilado, una fuerza electrostática producida por una fuente de alto voltaje de corriente directa (Corriente Alterna en algunos casos) se utiliza para impulsar el proceso de estiramiento. Este campo se aplica a las gotas de solución de polímero (o una masa fundida) pasada desde la punta de un orificio fino (la cual puede ser una aguja). La técnica tiene su

origen en los estudios sobre campos eléctricos iniciados por Lord Rayleigh en el siglo XIX, y fue patentada originalmente en 1902, aunque fue en 1934 que Formhals consideró el procedimiento como un medio para procesar hilos textiles. Fue Taylor quien, en su trabajo, desarrolló la comprensión teórica de la influencia de un campo eléctrico en un pequeño volumen de líquido, cuando se aplica un campo eléctrico a una gota de líquido, se acumula una carga electrostática en la punta de esta gota. En la Figura 3 se presenta el proceso de fabricación de fibras de PVDF, en el inciso (b) se visualiza el denominado cono de Taylor.

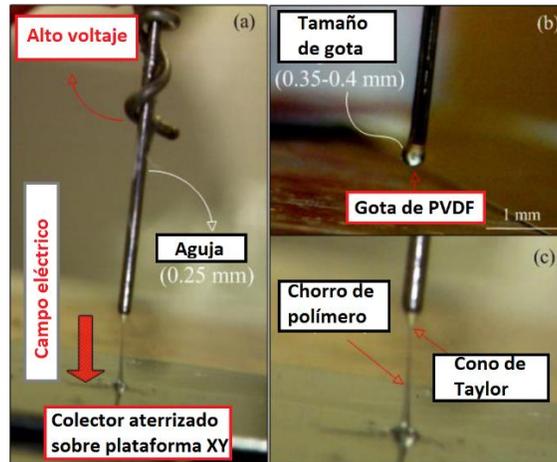


Figura 3: Proceso de fibra PVDF de electrohilado de campo cercano. Adapta de (Liu, Pan, Lin, & Lai, 2013).

En consecuencia, la repulsión de carga funciona contra la tensión superficial, haciendo que la forma cambie de una superficie ampliamente esférica a una forma de cono alargado (más tarde conocido como Cono de Taylor, ver Figura 4), luego se libera un chorro de la hilera capilar. Este chorro puede tomar un camino complejo y está sujeto a inestabilidades inducidas por cargas eléctricas, pero en ausencia de un soluto polimérico viscoso, el líquido finalmente se atomizará en pequeñas gotas, este es el origen del importante proceso de electroaspersión. (Nedjari, Hébraud, & Schlatter, 2015, pág. 3)

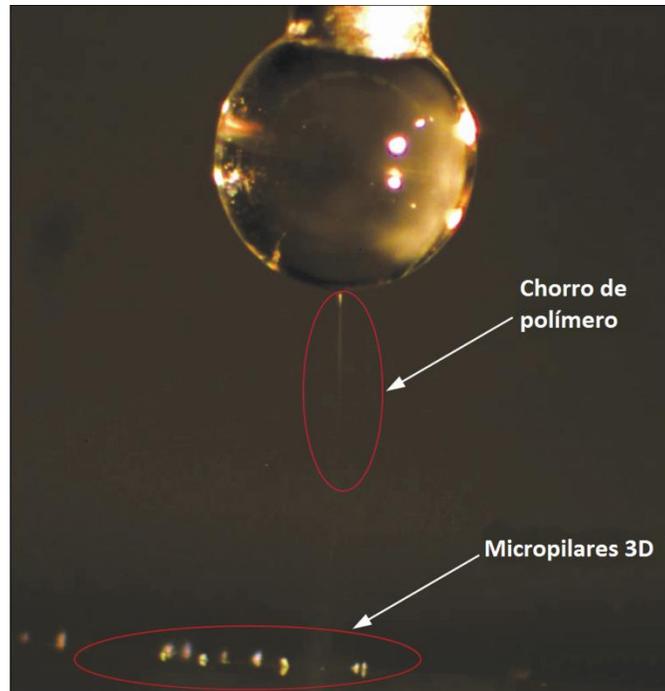


Figura 4: Chorro de polímero saliendo del cono de Taylor.

10.3 Parámetros en el proceso de electrohilado

La necesidad de fibras con diámetros controlados y morfología ha llevado a muchos estudios de la relación entre las propiedades de la fibra y los parámetros variables. Es útil clasificar estos parámetros en tres categorías: solución o parámetros del material, tales como viscosidad y / o concentración, operación parámetros que consideran los principales factores críticos en los estudios teóricos y aplicados, como el voltaje, la distancia de trabajo, la velocidad de flujo, etc. y finalmente los parámetros ambientales como la humedad y la temperatura. Estos factores pueden influir en la morfología de la fibra individualmente de alguna manera, o pueden funcionar en armonía entre sí. La Tabla 1 proporciona un resumen de algunos de los parámetros más importantes y su efecto sobre el diámetro y / o la morfología de la fibra. En la Figura 5 se presenta un arreglo real de una configuración de Electrohilado de campo cercano cilíndrico (CNFES por sus siglas en inglés) en donde se relaciona los parámetros del proceso con sus respectivos elementos del sistema.

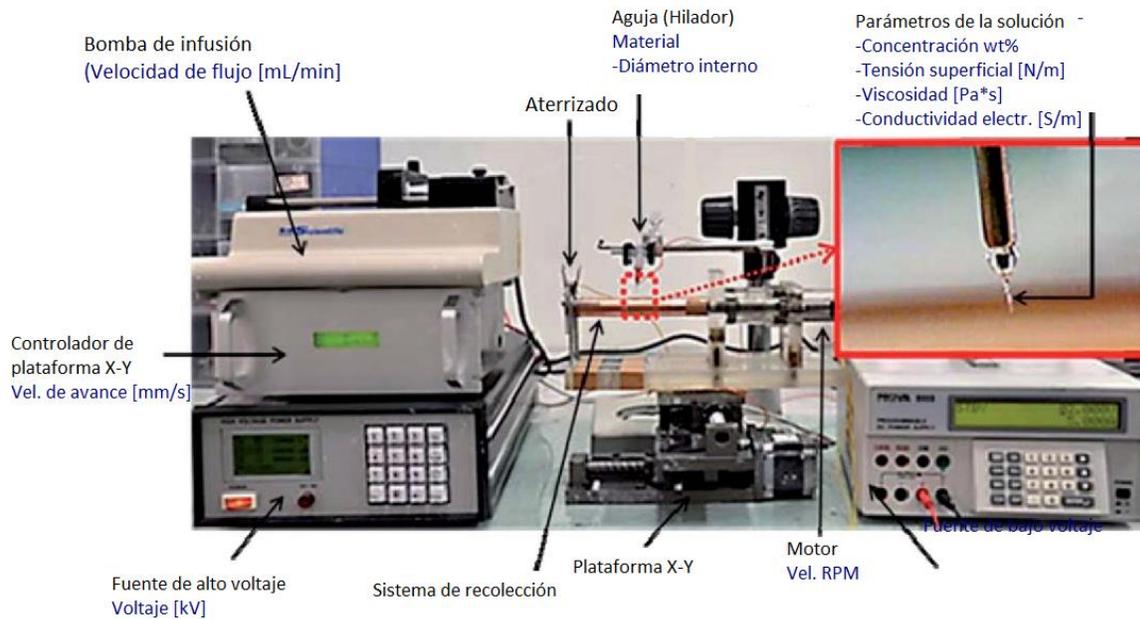


Figura 5: Montaje experimental del proceso CNFES. Adaptado de (Cheng-Tang , y otros, 2014).

Tabla 1: Parámetros de electrohilado y su influencia en la morfología de las fibras.

Parámetro	Efecto en las propiedades de la fibra
Propiedades de la solución	
Viscosidad	Diámetro de la fibra, mayor viscosidad conlleva a mayor diámetro. Formación de beads (perlas)
Peso Molecular	Un factor en la viscosidad.
Concentración de polímero	Incrementa la viscosidad y la cantidad de polímero depositado.
Conductividad eléctrica	El diámetro de la fibra decrece con el incremento de la conductividad, además los materiales iónicos pueden reducir la inestabilidad.
Propiedades del solvente	
Tensión superficial	En mayor magnitud mayor número de defectos (beads). A menor magnitud fibras más lisas.
Permitividad	La conductividad parece más influenciada por las propiedades del solvente y las trazas de impurezas iónicas.
Presión de vapor	Puede causar problemas con la evaporación del solvente durante el proceso de electrohilado. Si

	es muy bajo puede no evaporarse. La evaporación del solvente puede influenciar la formación de la morfología no cilíndrica
Condiciones de operación	
Voltaje aplicado	El diámetro de la fibra en principio se reduce a medida que aumentan las fuerzas sobre la fibra; por otro lado, la tasa de producción aumentó, lo que puede aumentar la producción de fibra
Distancia de trabajo	A distancias muy cortas se ha demostrado la disminución significativa de la inestabilidad del chorro. A distancias muy largas la fibra se puede romper por su propio peso.
Velocidad de flujo de solución	Un caudal demasiado pequeño detiene el desarrollo del cono Taylor; demasiado rápido diámetros más grandes y mayor número de defectos.
Diámetro interno del hilador	De acuerdo a Heikkila y otros (2008) mencionado por Wee-Eong (2020), el aumento del diámetro de la hilador tiene el efecto de aumentar el diámetro, la distribución y la productividad de las fibras. Esto puede deberse a una mayor cantidad de masa disponible en la punta para el proceso de hilado.
Condiciones ambientales	
Temperatura	El diámetro de la fibra a través de cambios en la viscosidad puede afectar algunas propiedades de la solución. De acuerdo con De Vrieze y otros (2009) citado por Blesson y otros (2021) la velocidad de evaporación incrementa con el incremento de la temperatura.
Humedad	Una mayor humedad genera poros en las fibras. Así mismo una alta humedad puede obstruir el flujo de solución al secarse la misma en la punta del hilador o aguja.

Aunque muchos de los parámetros cruciales (como la viscosidad) dependen de las propiedades del polímero, el disolvente también es importante en el proceso de electrohilado. Factores particularmente importantes son, en primer lugar, la presión de vapor, que puede tener un efecto importante en la morfología del polímero; en segundo lugar, la polaridad que influirá en la conductividad y, por lo tanto, en la interacción con el campo eléctrico; En tercer lugar, la tensión superficial, que es una fuerza que debe superar el campo eléctrico. Por supuesto, la adición del polímero modificará aún más las propiedades y hay una gama de aditivos que también pueden afectar el comportamiento de la solución. Por ejemplo, la viscosidad se puede aumentar mediante la adición de dibencil sorbitol y la tensión superficial se puede modificar mediante la adición de tensioactivos.

10.4 Fibras poliméricas de escala nanométricas

La generación de materiales con alargamiento en forma de fibras es un aspecto comercialmente importante de la ciencia de los polímeros. El acto de estirar un sistema macromolecular en una fibra orienta constituye las cadenas de polímero y aumenta las interacciones intermoleculares; por lo tanto, aunque el diámetro de una fibra se reduce mucho por el proceso de estirado, esto se ve compensado por el módulo aumentado de las fibras que puede producir algunos de los materiales más resistentes conocidos. Por ejemplo, peso por peso, la seda de araña es 5 veces más fuerte que el acero. Muchas de las aplicaciones de Nylon 6,6 se basan en la resistencia proporcionada por las estructuras que se desarrollan en el dibujo; y otra poliamida, Kevlar es bien conocida por su alta resistencia inducida en virtud del enlace de hidrógeno y la estructura de fase. Menos obvio, el polietileno se puede convertir en un material de resistencia ultra alta mediante estiramiento.

Una propiedad interesante es su alta relación área; comparada con fibras elaboradas por extrusión o procesos de hilado, las fibras poseen un diámetro mucho más diminuto y una mayor relación área/volumen incluso llegando a obtener fibras con diámetros por debajo de los 50 nm. Estas nanofibras tienen aplicaciones potenciales en diversos campos de la industria, pueden dispersarse en otras matrices poliméricas y desarrollar propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, ópticas; o bien pueden usarse en diferentes procesos con aplicaciones específicas a nivel nanométrico.

10.5 Forma, estructura y textura superficial

De acuerdo a las numerosas investigaciones, se han presentado diversas formas de secciones transversales de las fibras electrohiladas que van ligadas a las condiciones de

cambio de fase de líquido a sólido, así como también de la distribución de disolvente y soluto. Las formas de las nanofibras por otro lado también dependen de los polímeros utilizados. En la Figura 6 se presenta algunas formas y aspectos superficiales de fibras obtenidas a través de electrohilado.

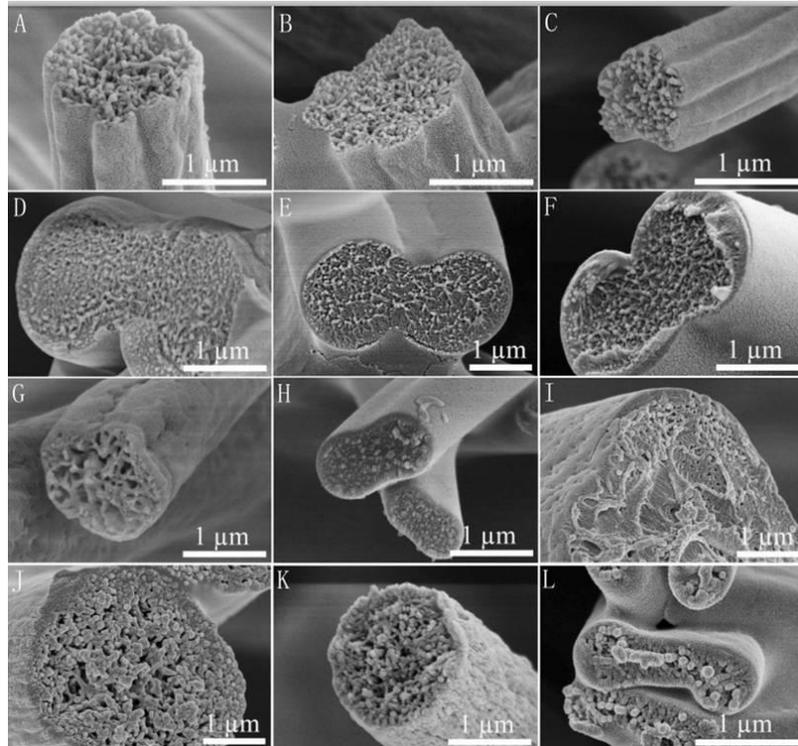
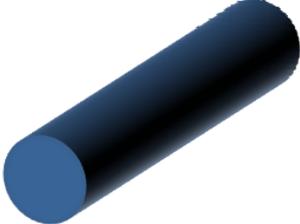
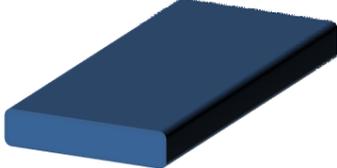
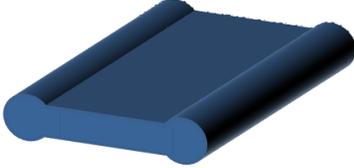
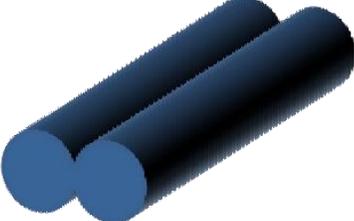
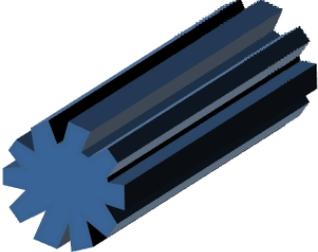


Figura 6: Secciones transversales de fibras representativas de poliestireno electrohilado (PS) a diferentes concentraciones y distintos disolventes.

Se ha visto también que las secciones aplanadas en las fibras electrohiladas se debe al manejo de disolventes más volátiles, como es el caso del uso de diclorometano (DCM) en las investigaciones de Celebioglu y Uyar en 2011. Otros parámetros que están ligados directamente con la estructura transversal de las fibras son la concentración y la temperatura, a mayor concentración se obtiene secciones redondas y a mayor temperatura fibras en forma de cintas o aplanadas (Amiraliyan y otros, 2009). En la Tabla 2 se presentan las diferentes estructuras representativas que se han reportado, en donde la vaporización del solvente y la capa superficial del polímero son determinantes en la forma final de la fibra.

Tabla 2: tipos de estructuras de fibras electrohiladas.

Estructura	Mecanismo propuesto
<p data-bbox="326 285 729 310">Sección transversal circular sólida</p> 	<p data-bbox="841 285 1419 541">Difusión constante de disolvente a lo largo de la sección transversal de las fibras desde el núcleo hasta la superficie. Reducción uniforme del diámetro de la fibra a medida que el disolvente se vaporiza hasta que se forma un núcleo sólido.</p>
<p data-bbox="418 590 634 615">Fibra plana / cinta</p> 	<p data-bbox="841 590 1386 709">La formación de piel estable y la rápida vaporización del solvente dan como resultado una pared delgada de fibras que colapsan</p>
<p data-bbox="345 894 708 919">Fibra con forma de mancuerna</p> 	<p data-bbox="841 827 1419 1129">La formación de piel estable y la vaporización menos rápida del solvente dan como resultado el colapso de la pared en el medio. La tasa de vaporización es suficiente para que la sección media sustancial forme paredes delgadas que se derrumban, pero son insuficientes para evitar la acumulación de material en sus extremos.</p>
<p data-bbox="435 1199 618 1224">Fibras gemelas</p> 	<p data-bbox="841 1194 1403 1402">La formación de piel estable y la vaporización menos rápida del solvente dan como resultado el colapso de la pared en el medio. La tasa de vaporización solo es suficiente para que se colapse la parte central de la fibra.</p>
<p data-bbox="337 1520 716 1545">Fibra con ranuras longitudinales</p> 	<p data-bbox="841 1516 1419 1682">Huecos que forman líneas de debilidad a lo largo de la piel que provocan un pliegue cutáneo preferencial en esa dirección, lo que da como resultado surcos.</p>

10.6 Estructura 3D en nanofibras

Actualmente existen muchos métodos para conseguir una membrana electrohilada en 3D, ya sea en el mismo proceso del electrohilado o bien un tratamiento posterior a este. Dependiendo los requisitos de la aplicación se fabrican redes con entramados con un paso entre fibras deseado. En la Figura 7 se presenta una de las técnicas para la generación de malla en 3D, que es la deposición de capa por capa a través de un equipo de acción o movimiento mecánico (Feng Li, y otros, 2018). En este tipo de técnica el grosor de la membrana depende del tiempo de deposición y del camino pre establecido por la máquina. La técnica de deposición de capa por capa se puede complementar con la introducción a agentes aglutinantes para mejorar la adhesión entre capas y otras propiedades aplicables al crecimiento celular (Abdal-hay, Abbasi, Gwiazda, Hamlet, & Ivanovski, 2018). También se ha demostrado que el tratamiento térmico con gas a presión es eficaz para fusionar las capas de fibra. El andamio 3D resultante mostró un módulo y una resistencia mucho mejores en comparación con el andamio sin tratar (Leung y otros, 2012). Sin embargo, un aspecto a considerar es que, debido a que las fibras mantienen una gran relación de aspecto de longitud a diámetro y baja rigidez, son individualmente demasiado débiles para ser auto soportante, por lo que se considera un pre molde, que en algunos casos ha sido una impresión en 3D convencional.

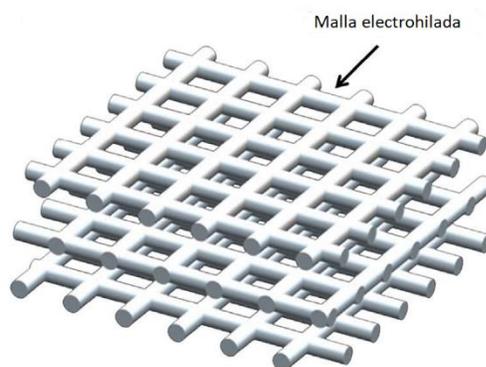


Figura 7: Ilustración de apilamiento de las mallas capa por capa para formar una construcción 3D.

Adaptado de (Feng Li, y otros, 2018).

10.7 Propiedades de las fibras

Algunas de las propiedades más interesantes de las nanofibras es la eficiencia de filtración de partículas en el aire, como es el caso las nanofibras fabricadas por Dong y otros en 2010 a base de PP capaces de filtrar partículas de NaCl de 75 nm. Otras propiedades sobresalientes son características ópticas, la liberación ultrarrápida de fármacos y la adhesión celular como es el caso de membranas electrohiladas de Nylon 6 (Wong y otros, 2013).

10.7.1 Propiedades mecánicas

Los andamios de nanofibras alineados exhiben propiedades mecánicas mejoradas y guían la orientación, migración, diferenciación y deposición de la matriz extracelular de las células.

Cuanto menor sea el diámetro de las fibras, mayor será el módulo y la resistencia de las fibras. Observaron que las fibras más finas tienen propiedades mejoradas debido al orden gradual de las cadenas moleculares y al aumento de la cristalinidad (Blesson , Taylor , & Reifsnider , 2021).

10.8 Múltiples chorros-Producción en masa

Wee (2021) menciona que hay estudios que han demostrado que se pueden generar varios chorros giratorios a partir de una sola boquilla o cono de Taylor. Como es el caso del estudio realizado por Vaseashta (2007) en donde utilizó un colector ondulado, siendo su hipótesis que estas superficies contorneadas altera la distribución del campo eléctrico o bien genera una redistribución de cargas en las partes más contorneadas. La presencia de un campo eléctrico concentrado en la punta de la aguja hace que salgan de la punta múltiples chorros de electrohilado. Por otro lado, Liu y otros (2019) citado por Wee (2021) menciona que las cargas de entrada de la aguja ahora se comparten entre los chorros múltiples y esto reduce las fuerzas electrostáticas que estiran la fibra y da como resultado un diámetro promedio de fibra más alto. Así también, Wu y otros (2018) citado por Wee (2021), realizaron un estudio en profundidad sobre el valor dieléctrico de la solución y su efecto en la formación de chorros múltiples. Usando una selección de solventes, mostraron que a medida que disminuye la constante dieléctrica de la solución, disminuye el número de chorros. Cuando aumenta el voltaje aplicado, el número de chorros aumenta debido a una mayor densidad de carga.

10.9 Nylon 6,6

Nylon 6,6 es la fibra de poliamida de mayor importancia comercial en la industria textil utilizada para la producción de hilados, prendas de vestir, textiles industriales y alfombras. PA-66 tiene un punto de fusión de 262 °C y su temperatura de transición vítrea es de 65 °C. La fórmula química estructural del Nylon 6,6 se presenta en la Figura 8 (Gupta, Singh, & Kumar, 2014).

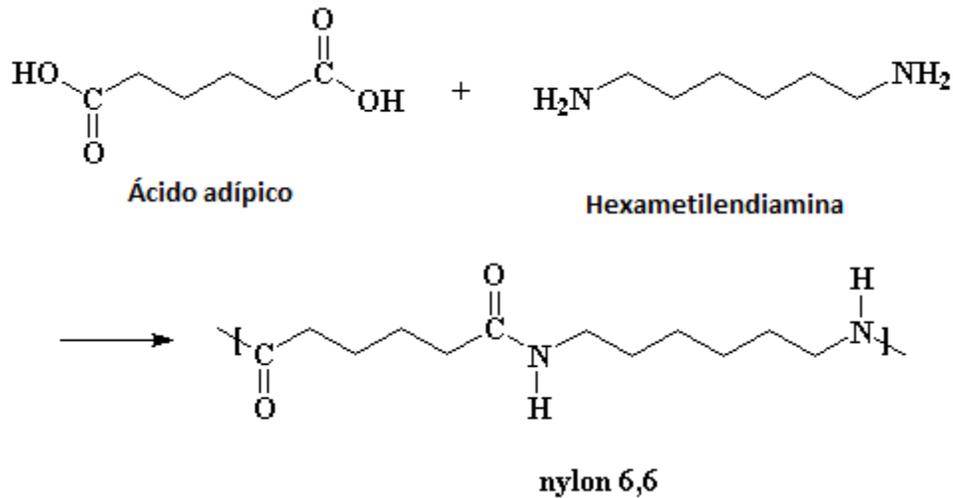


Figura 8: Fórmula química del Nylon 6,6 y esquema de síntesis.

Muchas de las aplicaciones del Nylon 6,6 se basan en la resistencia proporcionada por las estructuras que se desarrollan al estirar; de manera menos obvia, el polietileno se puede convertir en un material de resistencia ultra alta mediante dibujo. (Nedjari, y otros, 2015)

PA-66 es clasificado como un polímero termoplástico, es útil debido a su excelente resistencia al desgaste, buen coeficiente de fricción y muy buenas propiedades de resistencia a la temperatura y a los impactos. Así mismo, se clasifica como una fibra por lo que son bastante elásticos con buenas propiedades de protección, fatiga elevada y buena resistencia a la abrasión; en cuanto a su síntesis, esta es por condensación entre dos monómeros diferentes, el ácido adipico y la hexametilendiamina, como se observa en la Figura 8. Los solventes comúnmente utilizados para NYLON 6,6 son el ácido fórmico y el cloroformo.

10.10 Solventes

El solvente utilizado en la técnica de electrohilado se considera muy importante ya que está directamente relacionado con la tensión superficial y la tasa de evaporación. Los disolventes utilizados con más frecuencia incluyen ácido fórmico, cloroformo, tetrahidrofurano, ácido trifluoroacético, ácido acético, isopropanol, dimetilformamida, agua, diclorometano, metanol y etanol. Cuando se usa un solvente con tensión superficial y volatilidad promedio, el hilado de fibras es menos desafiante. Además, los disolventes con una tensión superficial muy baja no dan como resultado la formación de fibras. El agua es un buen disolvente probado para varios polímeros, pero debido a su tensión superficial muy alta, es muy difícil superar la tensión superficial para estirar las fibras (Ghosal, Agatemor, Tucker, Kny, & Thomas, 2018).

10.10.1 Ácido fórmico

El ácido fórmico es el ácido carboxílico más simple, que contiene un solo carbono. Ocurre naturalmente en varias fuentes, incluido el veneno de abejas y picaduras de hormigas, y es un reactivo sintético orgánico útil. Se utiliza principalmente como conservante y agente antibacteriano en la alimentación del ganado. En la Tabla 3 se presentan propiedades importantes del ácido fórmico.

Tabla 3: especificaciones de ácido fórmico.

Fórmula	HCOOH
Tensión superficial (Nm ⁻¹)	37.6
Constante dieléctrica (1)	58
Punto de ebullición (°C)	101

10.11 Carga eléctrica

La carga eléctrica es una propiedad de las partículas elementales que la poseen, caracterizado por la fuerza electrostática que entre ellas se ejerce. Dicha fuerza es atractiva si las cargas respectivas son de signo contrario, y repulsiva si son del mismo signo. La carga libre más pequeña que se conoce es la correspondiente al electrón. Es una carga negativa cuyo valor absoluto es $e = 1.60 \times 10^{-19}$ culombios [C].

10.12 Ley de Coulomb

La fuerza ejercida por una carga sobre otra fue estudiada por Charles Coulomb en 1785 mediante una balanza de torsión de su propia invención. A partir de la experimentación la ley de Coulomb o modelo de Coulomb se formula de la siguiente manera: la fuerza entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, su dirección es la de la recta que une las cargas y el sentido depende de los signos respectivos, de atracción si son de signo opuesto y de repulsión si son del mismo signo.

La expresión matemática de esta ley para dos cargas puntuales q y q' separadas por una distancia d es como sigue:

$$F = k_e \frac{qq'}{d^2} [N]$$

Donde $k_e = 9 \times 10^9$ [Nm/c²]

10.13 Campo eléctrico

La intensidad del campo eléctrico es uno de los importantes factores para alterar el patrón de las fibras electrohiladas (Choi, Kim, Shin, Lim, & An, 2017). El campo eléctrico es la fuerza por unidad de carga ejercida por una carga eléctrica dada. Esta carga eléctrica puede ser una carga puntual o puede extenderse por todo el volumen de una forma compleja. En electrohilado, el campo eléctrico a veces se informa como el voltaje aplicado dividido por la distancia de la punta al colector, conocida como la aproximación de placa paralela. En casi todos los casos, esta es una aproximación no válida ya que la geometría de una hilera y el cono de Taylor dan como resultado que la geometría general del electrodo sea una geometría de plano de punto, no una placa paralela. El campo eléctrico influirá en cualquier objeto cargado dentro de él y será modificado por cualquier objeto cargado que se encuentre dentro del volumen del espacio cerca del aparato de electrohilado. La fuerza de un campo eléctrico disminuirá con el cuadrado inverso de la distancia de la fuente. Los campos eléctricos "buscarán" el sumidero más cercano, como cualquier conductor conectado a tierra u objeto con carga opuesta. La intensidad de campo más fuerte existirá a lo largo de la distancia más corta entre la fuente y el sumidero (Escrig Murúa & López Cabrera, 2012).

10.14 Líneas de campo eléctrico

Las líneas de campo son aquellas cuyas tangentes, en cualquier punto, tienen la dirección del campo en este punto. Tales líneas son curvas continuas exceptuando en las singularidades tales como las cargas puntiformes, o en aquellos puntos donde el campo eléctrico es nulo.

10.15 Permitividad eléctrica

La constante ϵ_0 , es la permitividad eléctrica del vacío, que es muy próxima a la del aire seco, medio en el que Coulomb realizó sus experimentos. Su valor en el SI es:

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} [C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}] \text{ o } [F \cdot m^{-1}]$$

10.16 Constante dieléctrica o permitividad relativa

La constante dieléctrica es una medida de la polarización resultante de la aplicación de un campo eléctrico. Esta polarización puede ser electrónica, iónica o molecular. Así mismo es la relación entre la permitividad del medio y la del vacío:

$$k = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{E_0}{E}$$

10.17 Rigidez dieléctrica o Resistencia dieléctrica

La ruptura dieléctrica es un fenómeno que se presenta cuando el campo eléctrico a través de un dieléctrico es muy fuerte cual consigue sacar al electrón de su molécula. El material se convertirá en conductor presentando corrientes muy altas y llevándolo a su destrucción (Faynman & B. Leighton, 1998). Así mismo, a la rigidez dieléctrica se le considera como el valor máximo de la intensidad de campo eléctrico a la cual un material pierde su propiedad aislante y pasa a ser un conductor, esta propiedad se mide en V/m o kV/mm.

10.17.1 Rigidez dieléctrica del aire

La rigidez dieléctrica del aire es un aspecto muy importante en la configuración de los equipos de electrohilado de campo cercado, debido al hecho que se conservan distancias de trabajo muy reducidas que representa un riesgo por falla de arco eléctrico entre las terminales de la fuente de alto voltaje, para la configuraciones experimentales de campo eléctrico en donde se utiliza un sustrato aislado ubicado entre el hilador y el colector el riesgo es menor, pero en los casos en donde el hilador y el colector se encuentran separados por una distancia muy pequeña como puede ser 0.5 mm es importante contar con un control adecuado en la aproximación de estos dos elementos, a su vez otro factor importante a considerar es la humedad del ambiente, ya que este facilita la ionización de aire circundante que puede resultar en la formación de arco eléctrico.

10.18 Porcentaje en masa wt%

El porcentaje en masa (también llamado porcentaje en peso o peso porcentual) es la relación de la masa de un soluto en la masa de la disolución, multiplicado por 100% (Chang, 2010):

$$\text{porcentaje en masa} = \text{wt}\% = \frac{\text{masa de soluto}}{\text{masa de soluto} + \text{masa de disolvente}} \times 100$$

El porcentaje en masa es una magnitud adimensional.

10.19 Técnicas de caracterización

10.19.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés)

El método de elección para estudiar nanofibras es generalmente SEM, esto proporciona cómodamente una ruta para la visualización de fibras con diámetros de unas décimas de nanómetros. El uso de esta técnica junto con el software de análisis de imágenes proporciona información sobre la distribución de los diámetros de fibra. Un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) se encuentra principalmente compuesto por un emisor de electrones, una columna y diferentes lentes electromagnéticas. La función del emisor es generar un haz de electrones (electrones incidentes) con una aceleración entre 0.1 keV y 30 keV, el cual viaja a través de la columna (Vacío de 10^{-4} Pa) en donde pasa a través de las diferentes lentes electromagnéticas y un sistema de deflexión que permite manipular el haz de electrones para poder llevar a cabo un barrido superficial de la muestra. En el proceso se captan electrones tanto secundarios, retrodispersados y Auger, los electrones electrodispersados se producen cuando un electrón del haz choca con el núcleo de un átomo de la muestra siendo repelido en sentido contrario fuera de la misma, la intensidad de tal efecto varía de acuerdo al número atómico de la muestra proporcionando información sobre composición superficial de la muestra. Los electrones secundarios se producen cuando un electrón del haz pasa muy cerca de núcleo proporcionando suficiente energía a electrones interiores para saltar fuera de la muestra, estos electrones son de baja energía por lo que deben encontrarse cerca de la superficie, por lo que proporciona una valiosa información topográfica. Por último están los llamados electrones Auger, estos originados por los huecos que dejan los electrones secundarios que a su vez son ocupados por electrones más externos, generando una diferencia en las energías de la capa que se puede transmitir a otro electrón de la capa externa, expulsándolo del átomo como un electrón con una energía cinética específica (Goldstein, y otros, 2003).

10.19.2 Espectroscopía Infrarroja

El espectro infrarrojo se forma como consecuencia de la absorción de radiación electromagnética a frecuencias que se correlacionan con la vibración de conjuntos específicos de enlaces químicos dentro de una molécula. Primero, es importante reflexionar sobre la distribución de energía que posee una molécula en un momento dado, definida como la suma de los términos de energía contribuyentes:

$$E_{Total} = E_{Electrónica} + E_{Vibracional} + E_{Rotacional} + E_{Traslacional}$$

La energía de traslación se relaciona con el desplazamiento de moléculas en el espacio en función de los movimientos térmicos normales de la materia. La energía de rotación, que da lugar a su propia forma de espectroscopía, se observa como el movimiento de volteo de una molécula, que es el resultado de la absorción de energía dentro de la región de microondas. El componente de energía vibratoria es un término de energía superior y corresponde a la absorción de energía por una molécula cuando los átomos del componente vibran alrededor del centro medio de sus enlaces químicos. El requisito fundamental para la actividad infrarroja, que conduce a la absorción de radiación infrarroja, es que debe haber un cambio neto en el momento dipolar durante la vibración para la molécula o el grupo funcional en estudio (Coates, 2000).

10.20 Softwares

10.20.1 [OpenBuilds CONTROL v1.0.295](#)

OpenBuilds CONTROL es una aplicación de software gratuito para conectarse y controlar una máquina CNC, láser, plasma o Dragknife¹.

10.20.2 [Arduino \(IDE\)](#)

El software Arduino (IDE) de código abierto facilita la escritura de código y la carga en la placa. Este software se puede utilizar con cualquier placa Arduino².

10.20.3 [AutoCAD ®](#)

AutoCAD ® es un software de diseño asistido por computadora (CAD) en el cual se apoyan tanto arquitectos como ingenieros y profesionales de la construcción para crear dibujos precisos en 2D y 3D³.

10.20.4 [SolidWorks ®](#)

SOLIDWORKS es un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. El software que ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto⁴.

¹ Para más información acerca de OpenBuilds CONTROL visitar: <https://software.openbuilds.com/>.

² Para más información acerca de Arduino (IDE) visitar: <https://www.arduino.cc/en/software>.

³ Para más información acerca de AutoCAD® visitar: <https://www.autodesk.mx/>.

⁴ Para más información acerca de SolidWorks visitar: <https://www.solidworks.com/es>.

10.20.5 [COMSOL Multiphysics®](#)

COMSOL Multiphysics® es una plataforma de simulación que abarca todos los pasos del flujo de trabajo de modelado, desde la definición de geometrías, propiedades de materiales y la física que describen fenómenos específicos hasta la resolución y posprocesamiento de modelos para producir resultados precisos y confiables⁵.

10.21 [Equipamiento complementario](#)

10.21.1 [Fuente de alto voltaje](#)

Fuente de alto voltaje de corriente directa regulable de 0 a 20 kV con una disponibilidad de corriente de aproximadamente 1 mA. La fuente cuenta con un potenciómetro para la regulación de voltaje, un interruptor de encendido, un botón de arranque y un botón de paro; cuenta además con dos indicadores luminosos, uno de color amarillo para indicar el estado de la conexión a la toma de corriente alterna y otro de color rojo para indicar la operación del equipo. El indicador luminoso de color rojo comenzará a parpadear al momento de presionar el botón de arranque lo cual energizará el circuito de alto voltaje.

10.21.2 [Bomba de infusión KDScientific 100](#)

Una bomba de infusión básica de una sola jeringa que combina precisión con simplicidad. En la Tabla 4 se presentan especificaciones de la KDScientific 100.

Tabla 4: especificaciones KDScientific 100.

Max. No. de jeringas	Uno
Tamaño de la jeringa	10 µl a 60 ml
Dimensiones	9 x 6 x 5 pulg. 23 x 15 x 12 centímetros
Peso	4,5 libras (2 kg)
Fuerza lineal	20 libras (9 kg) mín.
Avance por micropaso	0.529 micrones (1/2 paso)
Velocidad de paso máxima (1/2 paso)	400 pasos / seg
Tasa de paso mínima	1 paso / 30 seg.
Exactitud	± <1%
Alarma audible	(Opcional) **

⁵ Para más información acerca de COMSOL Multiphysics® visitar: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.

11. Estado del arte (Antecedentes)

El electrohilado de campo cercano es una de las técnicas líderes en la colocación precisa de nanofibras. La precisión y exactitud de la deposición de fibras también ha mejorado enormemente desde la simple formación de fibras orientadas en un colector hasta la deposición precisa de la fibra en un punto específico. A pesar del progreso, todavía se deben tener en cuenta varias limitaciones intrínsecas o características del electrohilado de campo cercano cuando se emplea esta técnica (Wee Eong, 2020).

Sin embargo, esto no impidió que los investigadores usaran agujas extremadamente finas para hilar nanofibras. Chang y otros (2008) utilizaron una punta de aguja de 100 μm de diámetro para electrohilado de óxido de polietileno, mientras que Camillo y otros (2013) utilizaron una aguja de tungsteno como hilador con punta de calibre 26, para electrohilar un polímero conjugado poli [2-metoxi-5- (2-etilhexiloxi) -1,4-fenilenvinileno] (MEH-PPV) mezclado con óxido de polietileno (Wee Eong, 2020).

El desarrollo posterior en el proceso de hilatura por electrohilado de campo cercano ha intentado mejorar la precisión en la deposición de fibra y reducir el diámetro de la misma. Camillo y otros (2013) pudieron fabricar fibra de 100 nm de diámetro a un voltaje aplicado de 1.5 kV y una distancia de punta a colector de 500 μm usando una hilera de punta fina modificada. Los informes separados de Chang y otros (2008) y Bisht y otros (2011) han demostrado que un voltaje más alto conduce a un aumento significativo en el diámetro de la fibra (en el rango del micrómetro) y a la pérdida de la estabilidad del chorro. El remedio es reducir significativamente el voltaje utilizado en el proceso de electrohilado a aproximadamente 200 a 600 V con una distancia de punta a colector de aproximadamente 0.5 a 1 mm. Sin embargo, las cargas en la gota de solución en la punta de la aguja fueron insuficientes para liberarse de la tensión superficial para iniciar el giro eléctrico sin ayuda. Chang y otros (2008) usaron una punta de sonda de tungsteno y Bisht y otros (2011) usaron una punta de micro sonda de vidrio (diámetro de punta de 1 a 3 μm) para extraer mecánicamente la solución en la punta de la aguja para iniciar el electrohilado. En el estudio de Chang y otros (2008), la reducción del voltaje de electrohilado de 1,5 kV (distancia de trabajo de 500 μm) a 600 V reduce el diámetro de la fibra de 3 μm a 50 nm. Usando un voltaje más bajo de 200 V con una distancia de punta a colector de 1 mm, Bisht y otros (2011) pudieron modelar nanofibras (óxido de polietileno) con un diámetro inferior a 20 nm. Similar al electrohilado con una distancia más

larga entre la punta al colector, es probable que haya un voltaje óptimo cuyo diámetro de fibra obtenido será el más fino.

Song y otros (2015) mostraron que cuando el voltaje para el poliestireno de electrohilado aumentó de 400 a 500V, a una distancia de la punta al colector de 20 μm , el diámetro de la fibra se redujo cerca de 160 nm a aproximadamente 60 nm. Tal respuesta del diámetro de la fibra al voltaje se debe a un equilibrio de estiramiento del chorro y la velocidad a la que golpea el colector. Si bien el aumento del voltaje provoca un mayor estiramiento que reduce el diámetro de la fibra, esto también provoca una mayor aceleración del chorro donde el estiramiento termina cuando el chorro golpea el colector.

Para usar un voltaje de trabajo bajo en el electrohilado de campo cercano al tiempo que elimina la necesidad de usar un objeto físico para iniciar el electrohilado, una alternativa es usar un voltaje más alto para iniciar el electrohilado y cambiar a un voltaje menor una vez que el chorro ha salido de la boquilla. Huang y otros (2014) utilizaron este concepto con un colector de escenario móvil para producir patrones ordenados con un paso de interfibra de 50 μm . Al controlar la altura entre la punta de la boquilla y la etapa del colector y la velocidad de la etapa, se pueden obtener fibras con diferente orientación y forma de sección transversal. En general, una distancia más cercana entre la punta de la boquilla y el colector (que varía de 0,5 mm a 2 mm) da como resultado fibras planas debido al impacto del chorro de electrohilado. Una limitación de la configuración es que el punto de aterrizaje en el inicio del chorro de giro eléctrico no se puede determinar, aunque se puede hacer un ajuste posterior después de que el chorro haya aterrizado o la estructura se pueda construir en función del desplazamiento relativo al punto de aterrizaje. Para controlar el punto de aterrizaje del jet de giro eléctrico, se puede establecer un punto objetivo.

El electrohilado de campo cercano y bajo voltaje ha mostrado características que difieren del electrohilado de campo cercano convencional que usa voltaje más alto. El diámetro de la fibra ya se ha demostrado que es más pequeño con esta técnica. Con baja tensión, electrohilado de campo cercano se descubrió que el diámetro de la fibra era sensible al movimiento de la etapa del colector debido al estiramiento mecánico; baja velocidad que da lugar a un mayor diámetro de fibra y viceversa (Bisht, y otros 2011). En lugar de una punta de hilera muy fina, Bisht y otros (2011) demostraron que es posible hilar fibras con un diámetro inferior a 100 nm con una aguja de calibre 27 (diámetro interno de aproximadamente 200 μm).

A fin de depositar patrones adecuadamente, es necesario encontrar una velocidad de colector adecuada en función de la velocidad del chorro, una vez la velocidad del jet se sincronice con la velocidad del colector una fibra derecha es obtenida. La velocidad del chorro

es determinada como la velocidad de impresión más baja a la cual se obtiene fibras derechas (Martínez Prieto, y otros, 2020). De acuerdo al estudio realizado por Martínez y otros (2020) se requiere menor velocidad de impresión para obtener fibras más derechas en sustratos conductivos como un plato de cobre en lugar de un sustrato no conductivo como el PDMS. También se concluye que, en sustratos no conductivos, para constantes dieléctricas más altas se requiere mayor velocidad de impresión, lo que quiere decir que el sustrato puede ser polarizado más fácil más fácilmente cuando cuenta con una constante dieléctrica mayor. En la Tabla 5 se presenta una comparativa de las ventajas entre configuraciones experimentales realizadas por otros con referencia al sistema propuesto en este proyecto.

Tabla 5: Comparativa entre configuraciones experimentales NFES.

Ventajas			Referencia
Mayor control y reducción del paso entre fibras.	Reducción del desfase entre punto deseado y el punto de deposición real	Distancia de trabajo constante. Conservación de la intensidad de campo eléctrico.	
✓		✓	(Xu, y otros, 2014)
✓	✓		(You, Ye, & Guo, 2017)
✓		✓	(Zheng, y otros, 2021)
✓	✓	✓	Propuesta

En la Tabla 6 se presentan una análisis sistemático de los parámetros de operación de otros sistema de electrohilado de campo cercano con el objeto de esclarecer los niveles de operación para el equipo propuesto.

Tabla 6: revisión sistemática de parámetros de operación y configuraciones experimentales (antecedentes).

Configuración experimental									Distancia de trabajo [mm]	Temperatura [°C]	Humedad relativa	Distancia de sustrato a electrodo auxiliar [mm]	Voltaje [kV]	Velocidad de flujo [mL/h]	Velocidad de avance [mm/s]	Grosor de fibra mín alcanzada [nm]	Referencia
Hilador			Electrodo o colector afilado			Sustrato o colector											
Tipo	Diámetro interno o calibre	Conexión eléctrica	Tipo	Material	Conexión eléctrica	Tipo	Material y grosor [mm]	Conexión eléctrica									
Estacionari	26G	Negativo	Pin afilado móvil		Positivo	Fijo	PE/ 100	Aislado	2			0.1	3		9	6800	(You, y otros, 2017)
Estacionari	30G (0.15 mm)	Positivo	Pin afilado fijo	Cu	Negativo	Móvil	Si	Aislado	1 a 3				0.3 a 1.5 (1.25)			500*	(Xu, y otros, 2014)
Estacionari	(0.2 mm)	Positivo	Pin afilado fijo		Negativo	Móvil	Vidrio de borosilicat	Aislado	80	23	56	0.05	30	0.1	2 a 500 (500)	300-700 (641)	(Lee, y otros, 2012)
Estacionari	210 um	Positivo	Pin afilado fijo		Negativo	Móvil	Silicio/0.2	Aislado	0.5-5 (4)				2		15-25	5100	(Zheng, y otros, 2021)

12. [Metodología](#)

12.1 [Diseño y construcción mecánica de la carcasa del sistema de electrohilado](#)

El diseño mecánico del sistema se realizó mediante el software SolidWorks, en esta etapa se extruyeron los elementos estructurales y a su vez se ensamblaron para definir los partes fijas y móviles del mismo. La descripción de todos los elementos utilizados en la construcción de la carcasa se enlista en la Tabla A1 ubicada en el ANEXO A.

En las Figura 9 , 10 y 11 se puede visualizar el ensamble completo del equipo de electrohilado, incluyendo las diferentes piezas de acrílico en conjunto con los perfiles de aluminio, motores y otros accesorios.

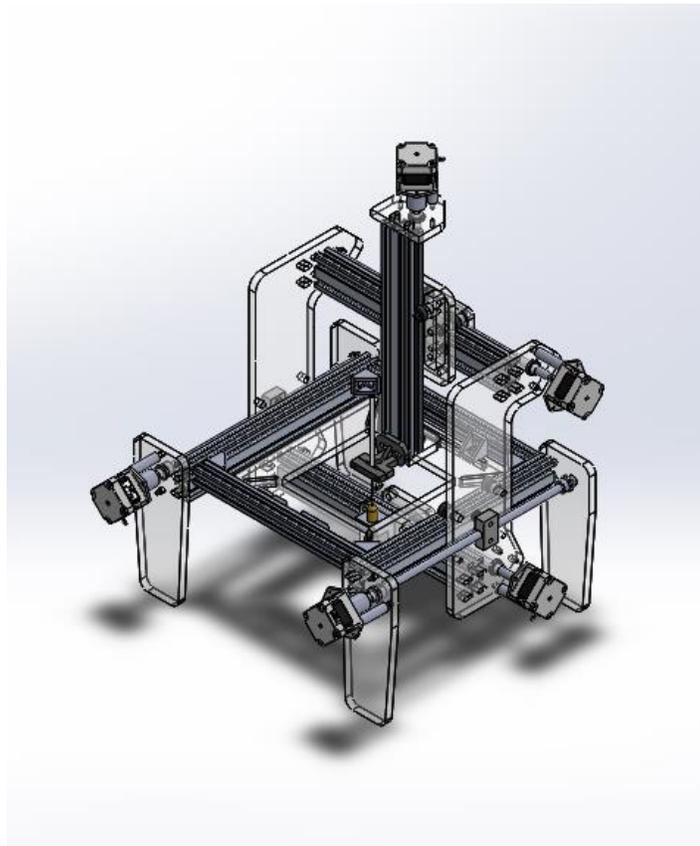


Figura 9: Vista isométrica del ensamble del equipo de ES.

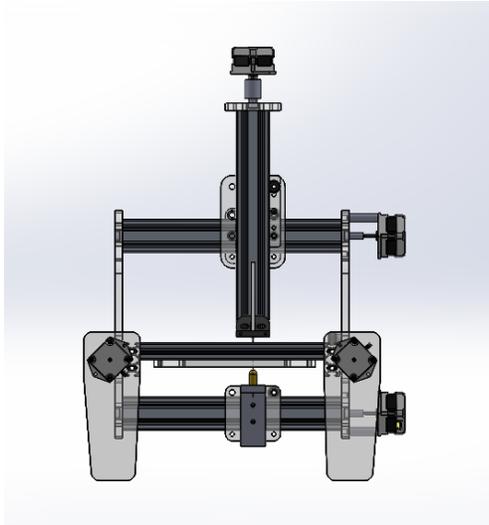


Figura 10: Vista frontal del ensamble del equipo de ES.

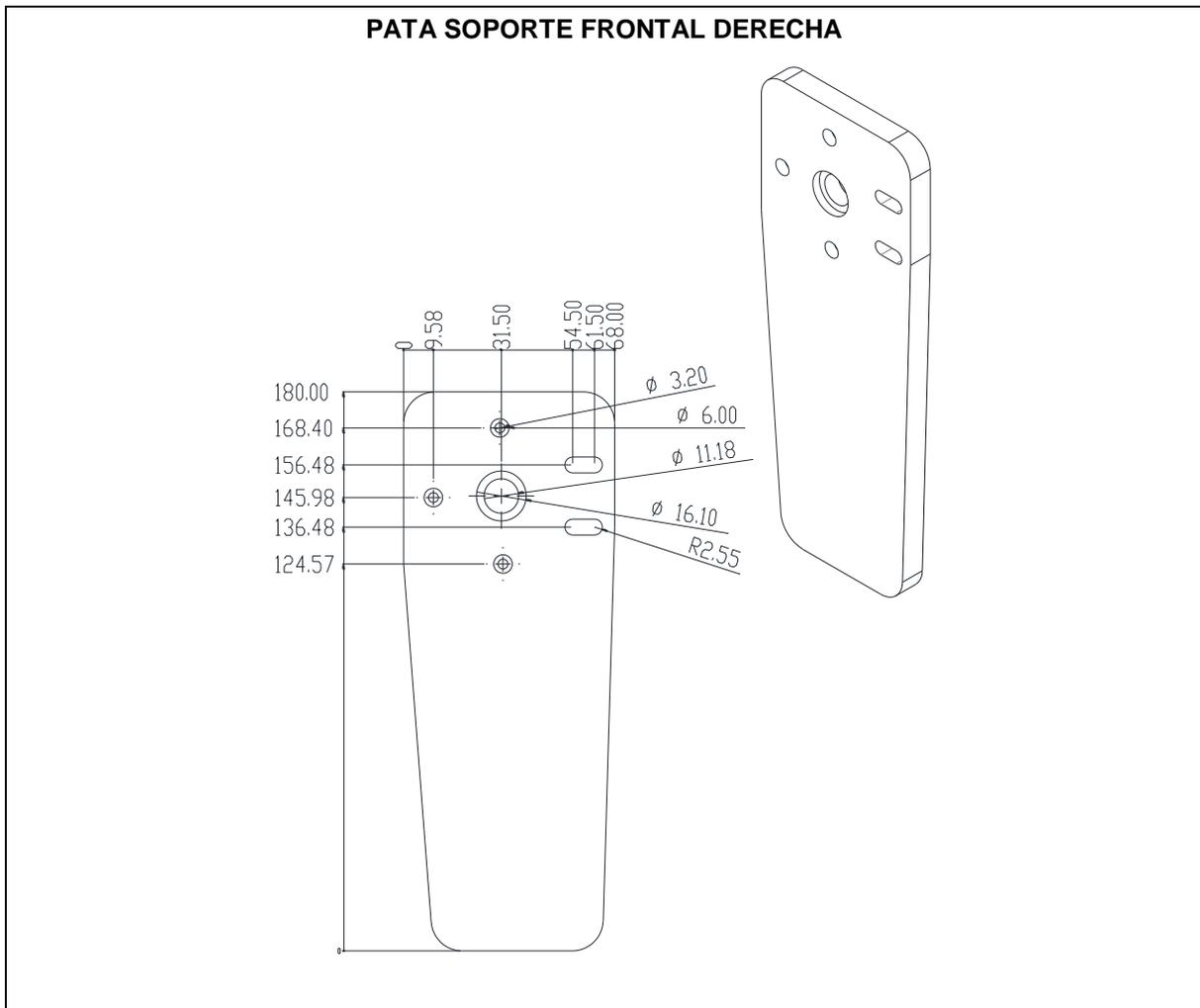


Figura 11: Vista lateral del ensamble del equipo de ES.

12.1.1.1 Piezas maquinadas

Dentro de las piezas diseñadas, 12 de estas fueron convertidas a formato DXF para su posterior maquinado en una lámina de acrílico de 9 mm mediante corte CNC. El equipo de electrohilado propuesto contiene elementos estructurales de soporte para la instalación de accesorios mecánicos y eléctricos-electrónicos, además de brindar mecanismos para la transmisión de movimientos en los tres ejes X, Y y Z. En la siguiente tabla se presentan las piezas estructurales que conforman la carcasa del equipo, estas piezas son maquinadas por corte CNC o corte manual sobre equipo de banco de precisión.

Tabla 7: pieza maquinada Pata soporte frontal derecha PS-2A.



Nombre:	Pata soporte frontal derecha		
Clave:	PS-2A	Material:	Lámina de acrílico de 9 mm
Descripción:	<p>Pieza destinada para soportar el equipo de electrohilado. Contiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 perforaciones de 3.2 mm para la sujeción de un motor a pasos NEMA 17 con un abocardado de 4 mm de profundidad y 6 mm de diámetro. • 2 ranuras de 5.1 mm de diámetro de 7 mm de largo para fijar la pieza a la guía lineal V-Slot mediante tornillo Allen M5 de 10 mm de largo. • 1 perforación de Ø11.18 con abocardado de Ø 16.1 y 3 mm de profundidad. En esta perforación se posiciona de forma concéntrica el tornillo Acme de 8 mm conectado al eje del motor para la transmisión de movimiento. 		
Si no se indica lo contrario las cotas y la descripción están en milímetros.		Escala: NA	

Tabla 8: pieza maquinada Pata soporte posterior derecha PS-2B.

PATA SOPORTE POSTERIOR DERECHA			
Nombre:	Pata soporte posterior derecha		
Clave:	PS-2B	Material:	Lámina de acrílico de 9 mm
Descripción:	<p>Pieza destinada para soportar el equipo de electrohilado. Contiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 ranuras de 5.1 mm de diámetro de 7 mm de largo para fijar la pieza a la guía lineal V-Slot mediante tornillo Allen M5 de 10 mm de largo. • 1 perforación de Ø11.18 con abocardado de Ø 16.1 y 3 mm de profundidad. En esta perforación se posiciona de forma concéntrica el tornillo Acme de 8 mm conectado al eje del motor para la transmisión de movimiento. 		
Si no se indica lo contrario las cotas y la descripción están en milímetros.			Escala: NA

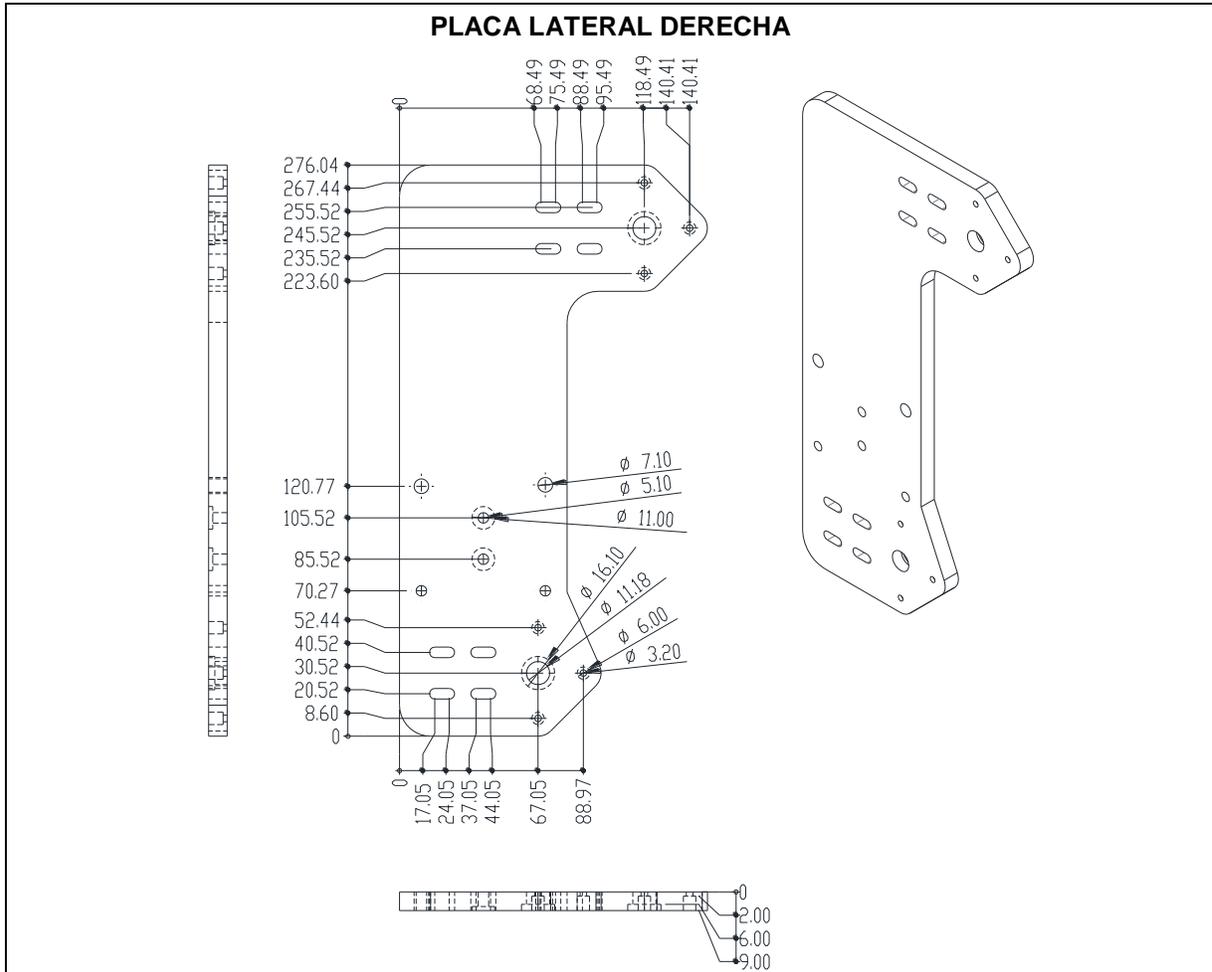
Tabla 9: pieza maquinada Pata soporte frontal izquierda PS-2C.

PATA SOPORTE FRONTAL IZQUIERDA			
Nombre:	Pata soporte frontal izquierda		
Clave:	PS-2C	Material:	Lámina de acrílico de 9 mm
Descripción:	<p>Pieza destinada para soportar el equipo de electrohilado. Contiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 perforaciones de 3.2 mm para la sujeción de un motor a pasos NEMA 17 con un abocardado de 4 mm de profundidad y 6 mm de diámetro. • 2 ranuras de 5.1 mm de diámetro de 7 mm de largo para fijar la pieza a la guía lineal V-Slot mediante tornillo Allen M5 de 10 mm de largo. • 1 perforación de Ø11.18 con abocardado de Ø 16.1 y 3 mm de profundidad. En esta perforación se posiciona de forma concéntrica el tornillo Acme de 8 mm conectado al eje del motor para la transmisión de movimiento. 		
Si no se indica lo contrario las cotas y la descripción están en milímetros.			Escala: NA

Tabla 10: pieza maquinada Pata soporte posterior izquierda PS-2D.

PATA SOPORTE POSTERIOR IZQUIERDA			
Nombre:	Pata soporte posterior izquierda		
Clave:	PS-2D	Material:	Lámina de acrílico de 9 mm
Descripción:	<p>Pieza destinada para soportar el equipo de electrohilado. Contiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 ranuras de 5.1 mm de diámetro de 7 mm de largo para fijar la pieza a la guía lineal V-Slot mediante tornillo Allen M5 de 10 mm de largo. • 1 perforación de Ø11.18 con abocardado de Ø 16.1 y 3 mm de profundidad. En esta perforación se posiciona de forma concéntrica el tornillo Acme de 8 mm conectado al eje del motor para la transmisión de movimiento. 		
Si no se indica lo contrario las cotas y la descripción están en milímetros.			Escala: NA

Tabla 11: pieza maquinada Placa lateral derecha PL-D.

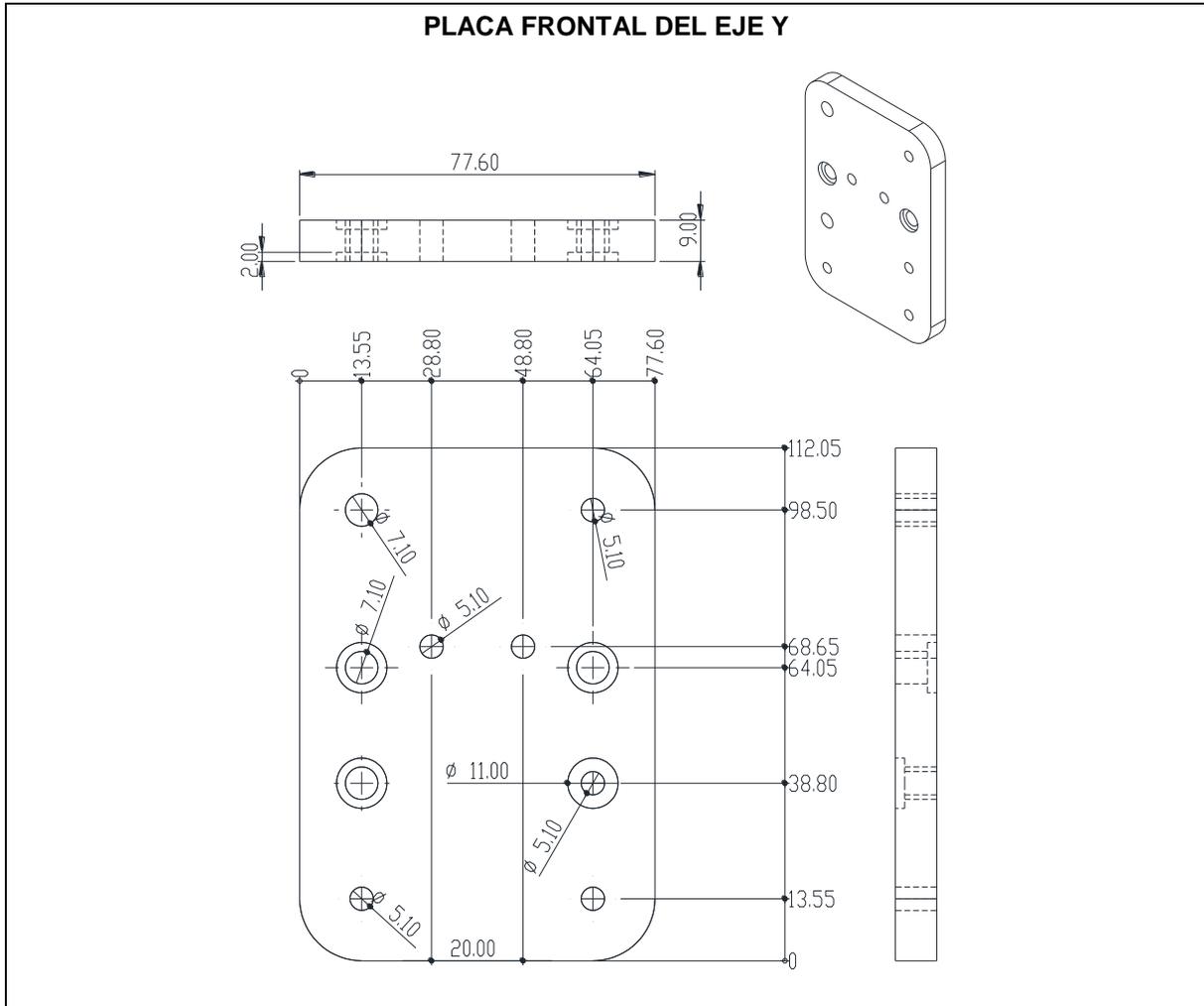


Nombre:	Placa lateral derecha		
Clave:	PL-D	Material:	Lámina de acrílico de 9 mm
Descripción:	<p>Esta pieza funciona como bloque de montaje para los motores NEMA 17 pertenecientes al eje Y; además en esta pieza se montan las guías lineales del eje Y, rueda mini wheel para deslizamiento en el eje X. Contiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 8 ranuras de $\varnothing 5.1$ mm de 7 mm de largo para fijar la pieza a la guía lineal V-Slot mediante tornillo Allen M5 de 10 mm de largo. • 2 perforación de $\varnothing 11.18$ con abocardado de $\varnothing 16.1$ y 3 mm de profundidad. En esta perforación se posiciona de forma concéntrica el tornillo Acme de 8 mm conectado al eje del motor para la transmisión de movimiento. • 6 perforaciones de 3.2 mm para la sujeción de dos motores a pasos NEMA 17, cada perforación con un abocardado de 7 mm de profundidad y $\varnothing 6$ mm. • 		
Si no se indica lo contrario las cotas y la descripción están en milímetros.		Escala: NA	

Tabla 12: pieza maquinada Placa lateral izquierda PL-I.

PLACA LATERAL IZQUIERDA			
Nombre:	Placa lateral izquierda		
Clave:	PL-I	Material:	Lámina de acrílico de 9 mm
Descripción:	<p>Esta pieza funciona como bloque de montaje para los motores NEMA 17 pertenecientes al eje Y; además en esta pieza se montan las guías lineales del eje Y, rueda mini wheel para deslizamiento en el eje X. Contiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 8 ranuras de $\varnothing 5.1$ mm de 7 mm de largo para fijar la pieza a la guía lineal V-Slot mediante tornillo Allen M5 de 10 mm de largo. • 2 perforaciones de $\varnothing 11.18$ con abocardado de $\varnothing 16.1$ y 3 mm de profundidad. En esta perforación se posiciona de forma concéntrica el tornillo Acme de 8 mm conectado al eje del motor para la transmisión de movimiento. 		
Si no se indica lo contrario las cotas y la descripción están en milímetros.			Escala: NA

Tabla 13: pieza maquinada Placa frontal del eje Y PF-Y.



Nombre:	Placa frontal del eje Y		
Clave:	PF-Y	Material:	Lámina de acrílico de 9 mm
Descripción:	<p>Pieza destinada para soportar el equipo de electrohilado. Contiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4 perforaciones de \varnothing 5.1 mm para la sujeción del sub-ensamblaje de una rueda mini wheel mediante tornillos M5. • 4 perforaciones de \varnothing 7.1 mm para la inserción de 4 tuercas excéntricas seguidas de accesorios para la sujeción de 4 llantas mini wheel. • 2 perforaciones de \varnothing 5.1 mm para la sujeción de una tuerca bloque para la transmisión de movimiento. • En algunas perforaciones se realiza abocardados de 2 mm de profundidad. 		
Si no se indica lo contrario las cotas y la descripción están en milímetros.		Escala: NA	

Tabla 14: pieza maquinada Placa posterior del eje Y PP-Y.

PLACA POSTERIOR DEL EJE Y			
Nombre:	Placa posterior del eje Y		
Clave:	PP-Y	Material:	Lámina de acrílico de 9 mm
Descripción:	<p>Pieza destinada para soportar el equipo de electrohilado. Contiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 perforaciones de \varnothing 5.1 mm para la sujeción del sub-ensamblaje de una rueda mini wheel mediante tornillos M5. • 2 perforaciones de \varnothing 7.1 mm para la inserción de 2 tuercas excéntricas seguidas de accesorios para la sujeción de 2 llantas mini wheel. • 2 perforaciones de \varnothing 5.1 mm para la sujeción de una tuerca bloque para la transmisión de movimiento. • En algunas perforaciones se realiza abocardados de 2 mm de profundidad. 		
Si no se indica lo contrario las cotas y la descripción están en milímetros.		Escala: NA	

Tabla 15: pieza maquinada Placa superior del eje z (PS-Z).

PLACA SUPERIOR DEL EJE Z			
Nombre:	Placa superior del eje z		
Clave:	PS-Z	Material:	Lámina de acrílico de 9 mm
Descripción:	<p>Pieza destinada para conformar el eje z. Contiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 perforaciones de 3.2 mm para la sujeción de un motor a pasos NEMA 17 con un abocardado de 4 mm de profundidad y 6 mm de diámetro. • 1 perforación de $\varnothing 11.18$ con abocardado de $\varnothing 16.1$ y 3 mm de profundidad. En esta perforación se posiciona de forma concéntrica el tornillo Acme de 8 mm soportado por un balero. • 2 ranuras de $\varnothing 5.1$ mm de 7 mm de largo para fijar la pieza a la guía lineal V-Slot mediante tornillo Allen M5 de 10 mm de largo. 		
Si no se indica lo contrario las cotas y la descripción están en milímetros.		Escala: NA	

Tabla 16: pieza maquinada Placa inferior del eje z (PI-Z).

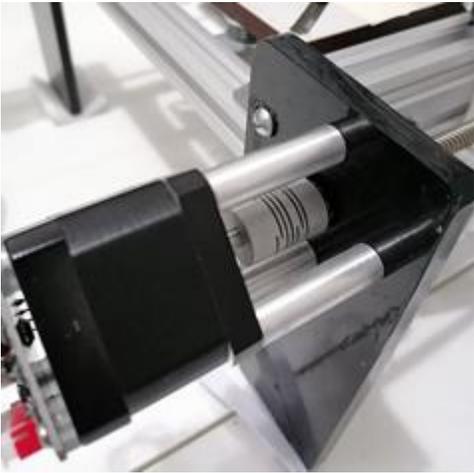
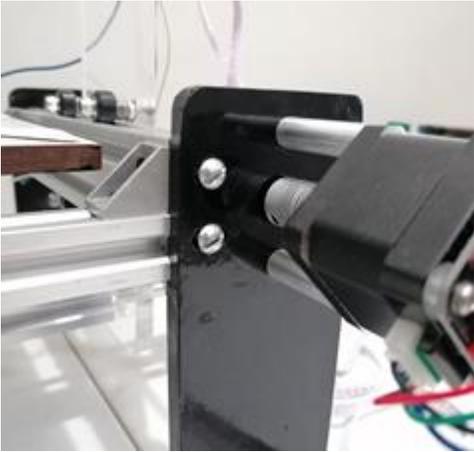
PLACA INFERIOR DEL EJE Z			
Nombre:	Placa inferior del eje z		
Clave:	PI-Z	Material:	Lámina de acrílico de 9 mm
Descripción:	<p>Pieza destinada para conformar el eje z. Contiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 perforación de $\varnothing 11.18$ con abocardado de $\varnothing 16.1$ y 3 mm de profundidad. En esta perforación se posiciona de forma concéntrica el tornillo Acme de 8 mm soportado por un balero. • 2 ranuras de $\varnothing 5.1$ mm de 7 mm de largo para fijar la pieza a la guía lineal V-Slot mediante tornillo Allen M5 de 10 mm de largo. 		
Si no se indica lo contrario las cotas y la descripción están en milímetros.		Escala: NA	

Tabla 17: pieza maquinada Placa base cama PBC.

PLACA BASE CAMA			
Nombre:	Placa base cama		
Clave:	PBC	Material:	Lámina de acrílico de 9 mm
Descripción:	<p>Pieza destinada para soportar el sustrato para la recolección de fibras electrohiladas.</p> <p>Contiene:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4 perforaciones de Ø 5.1 mm para la sujeción de la placa base mediante tornillos M5 y conector recto. • 4 ranuras de Ø 5.1 mm y 115 mm de largo para la sujeción del sustrato mediante un juego mecánico conformado por tornillo y resorte, como mecanismo de nivelación del sustrato. 		
Si no se indica lo contrario las cotas y la descripción están en milímetros.			Escala: NA

12.1.1.2 Armado mecánico

Se presenta el proceso de la construcción de la carcasa del equipo de electrohilado propuesto, en donde se detalla los elementos y accesorios para la colocación o fijación de partes móviles o fijas del equipo.

	<p>Tabla 18: proceso de armado de la carcasa del equipo de electrohilado de campo cercano.</p>
 <p>Figura T1: colocación de motor a pasos NEMA 17.</p>	<p>En la Figura T1 se observa el montaje de un motor NEMA 17 para el eje Y. Los motores NEMA 17 para los 3 ejes son fijados a la estructura mediante 3 tornillos Allen M3 de 6mm cabeza cilíndrica por 45 mm, en con conjunto con 3 espaciadores de aluminio de 35 mm. El eje del motor es acoplado al tornillo Acme de 8 mm mediante un conector flexible de 5 a 8 mm; este acoplador cuenta con ranuras para tornillos Allen M2.</p>
 <p>Figura T2: fijación de placa PS-2A a guía lineal V-slot .</p>	<p>Las placas PS-2A, PS-2B, PS-2C, PS-2D, PL-I, PL-D, PS-Z y PI-Z son fijadas a sus respectivas guías lineales V-slot 20x40 mm mediante 2 tornillos 3/16" x 1". En esta imagen se observa el uso de un conector recto de aluminio para dar mayor rigidez a la estructura, éste permite la unión entre una guía V-slot de 20x40 mm con otro guía V-slot de 20x20 mm. En la Figura T2 se observa la fijación de la pieza PS-2A a una guía lineal mediante tornillería.</p>
 <p>Figura T3: carro móvil del eje Y.</p>	<p>En la Figura T3 se observa uno de los dos carros del eje Y, éste está conformado por 4 ruedas mini, un bloque tuerca de 8 mm y una placa PL-D. Las ruedas son montadas a la placa mediante 4 tornillos M5 de 30 mm con tuerca de seguridad M5. El bloque tuerca Acme de 8 mm está fijado mediante 2 tornillo M5 de 20 mm y 2 tuercas de seguridad M5 a la placa PL-D.</p>

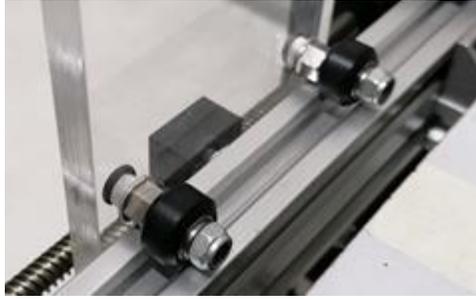


Figura T4: llantas mini wheel montadas en el carro.



Figura T5: vista explosionada de armado de llantas mini wheel.

En la Figura T4 se observa 2 de las 4 llantas utilizadas en el carro del eje Y. Las llantas minis (mini Wheel) son ensambladas mediante un tornillo M5 de 30 mm con tuerca de seguridad M5. En la Figura T5 se presenta la vista explosionada del ensamble, del lado derecho se hace uso de un espaciador recto de 6 mm, por el lado izquierdo se utiliza un espaciador de 6 mm excéntrico. El espaciador excéntrico es utilizado para crear una precarga en las llantas para ajustar con firmeza el carro a la guía lineal V-slot.

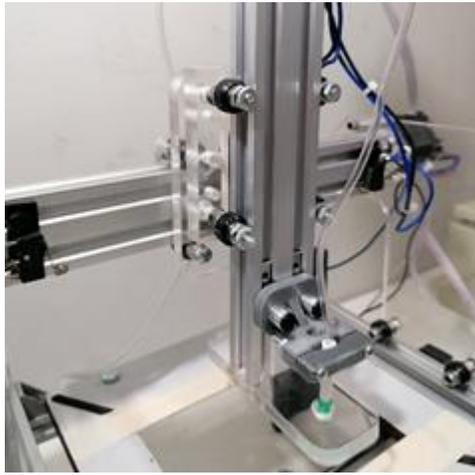


Figura T6: eje Z ensamblado.

En la Figura T6 se observa el eje Z montado sobre el eje X para su deslizamiento. Ensamble del carro para los desplazamientos en los ejes X y Z. Esta sección utiliza 8 llantas mini, 4 para el eje X y otras 4 para el eje Z, una placa PP-Y y PF-Y unidas mediante 4 tornillos de rosca estándar de 3/16"x 2" con su respectiva tuerca, arandela plana y rondana de presión. Se utiliza un bloque espaciador de acrílico de 12 mm. El soporte hilador (pieza impresa en PLA de color gris) está sujeto mediante dos tornillos M5 de 20 mm con espaciadores de aluminio de 9 mm, se utiliza dos tuercas Tee M5 dentro de las ranuras del riel V-Slot 20x40 mm. El soporte hilador está conformado por dos piezas impresas sujetadas por dos tornillos de 1/8" x 1 1/2" que a su vez regulan el apriete para la sujeción de la jeringa.



Figura T7: parte posterior del carro del eje X.

En la Figura T7 se observa la parte posterior del carro del eje Y, el bloque tuerca Acme de 8 mm está fijado mediante 2 tornillos M5 de 20 mm y 2 tuercas de seguridad M5 a la placa PP-Y. El tornillo Acme de 8 mm pasa a través del bloque tuerca Acme de 8 mm para la transmisión de movimiento.



Figura T8: ensamblaje del tornillo ACME.

En la Figura T8 se observa la colocación del tornillo ACME del eje X. El tornillo Acme está soportado en sus extremos por dos rodamientos NSK 688 8x16x5mm que descansan en las placas PL-D y PL-I; a su vez, se limita la traslación del tornillo Acme con 2 collares Acme de 8 mm. La guía lineal V-slot de 20x40 mm está sujeta a las placas PL-D y PL-I con 2 tornillos de rosca estándar 3/16" x 1" en cada lado.



Figura T9: mecanismos de nivelación de la cama y sustrato.

En la Figura T9 se observa el conjunto tornillo resorte para la nivelación de la cama en 4 puntos. La placa PBC (placa de baquelita mostrada en la imagen) es soportada por 4 tornillos de cabeza hexagonal de 1/4" x 2 1/2", estos tornillos en conjunto con un par de rondanas, una tuerca y un resorte permite la nivelación de la cama o soporte del sustrato.

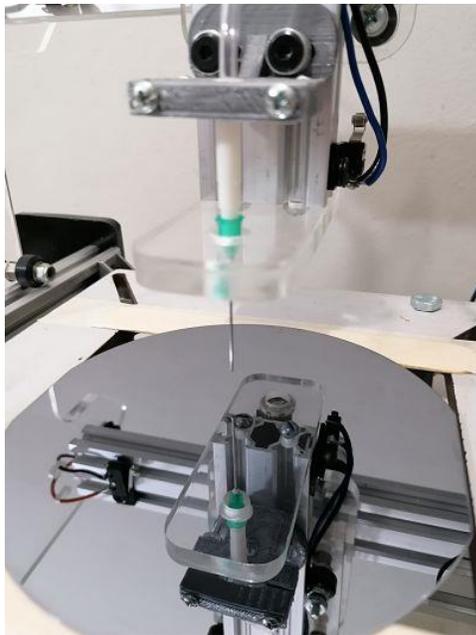


Figura T10: oblea de silicio montada sobre la placa base cama.

En la Figura T10 se puede ver la disposición del sustrato de silicio con referencia al hilador o jeringa, el sustrato es soportado por la placa PBC de material baquelita, el sustrato es nivelado conforme a la placa PBC con la ayuda de 4 tornillos de cabeza hexagonal de 1/4" x 2 1/2".

12.2 Diseño e instalación de los circuitos eléctrico y electrónico para el control del sistema de electrohilado

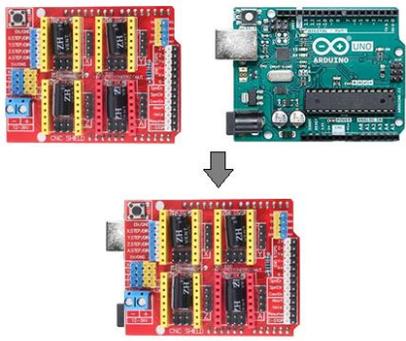
En la Tabla 19 se describen las etapas para instalación de dispositivos y programas para la alimentación eléctrica, control y operación del sistema de electrohilado, en el ANEXO A se encuentra la descripción de los diferentes dispositivos y accesorios eléctricos utilizados.

Tabla 19: metodología para la instalación eléctrica y electrónica del sistema de electrohilado.

<p>Conexión de Placa de desarrollo Uno a PC y carga de Firmware GRBL.</p>	<p>Pasos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Se carga la librería GRBL, con la versión V1.1g a través del software Arduino 1.6.7. Programa/ Incluir librería/ Añadir librería .ZIP. 2. Una vez cargada la librería se compila y se carga a la placa de desarrollo Uno.
--	---

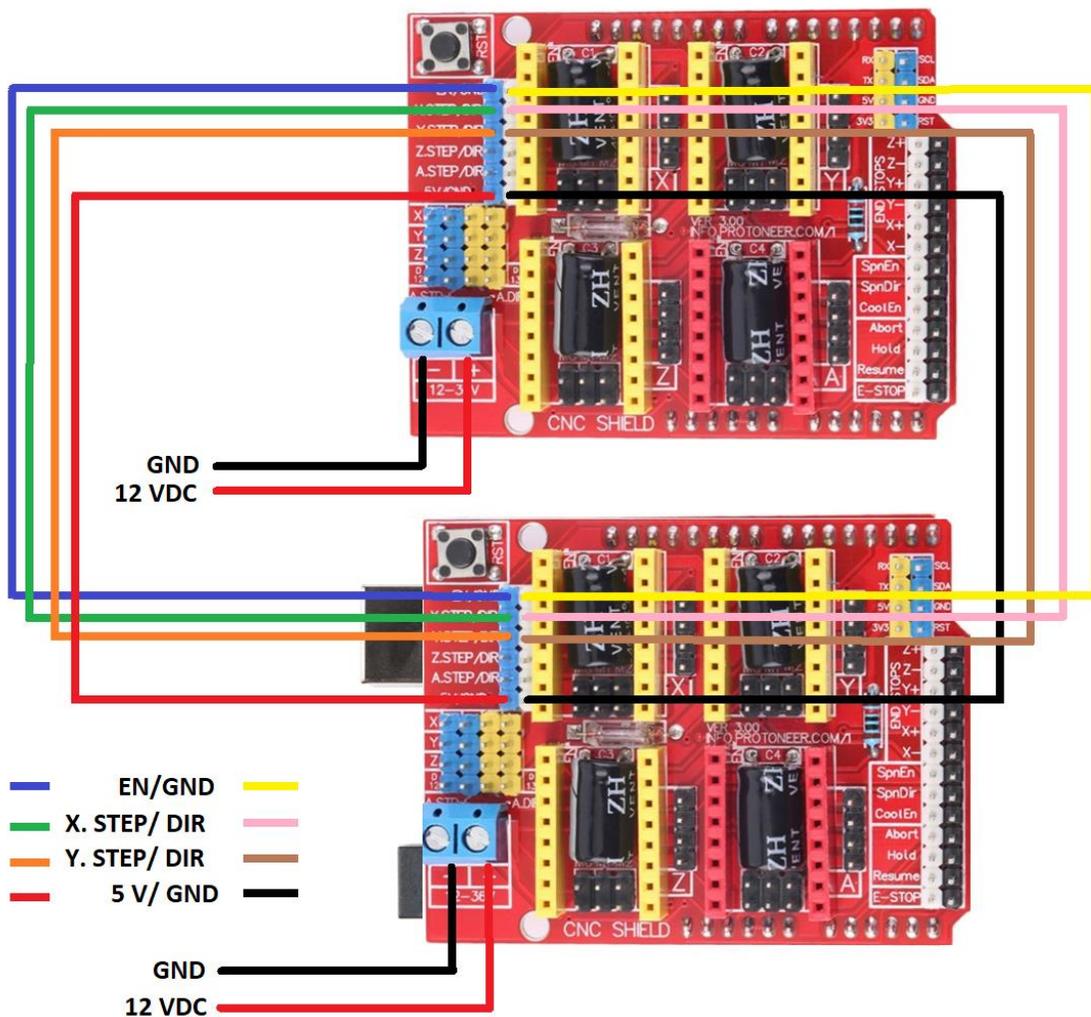


Montaje de CNC Shield V3 en Placa de desarrollo Uno



Una vez cargador el Firmware GRBL se monta la placa CNC Shield V3 sobre la placa de desarrollo Uno como se observa en la imagen.

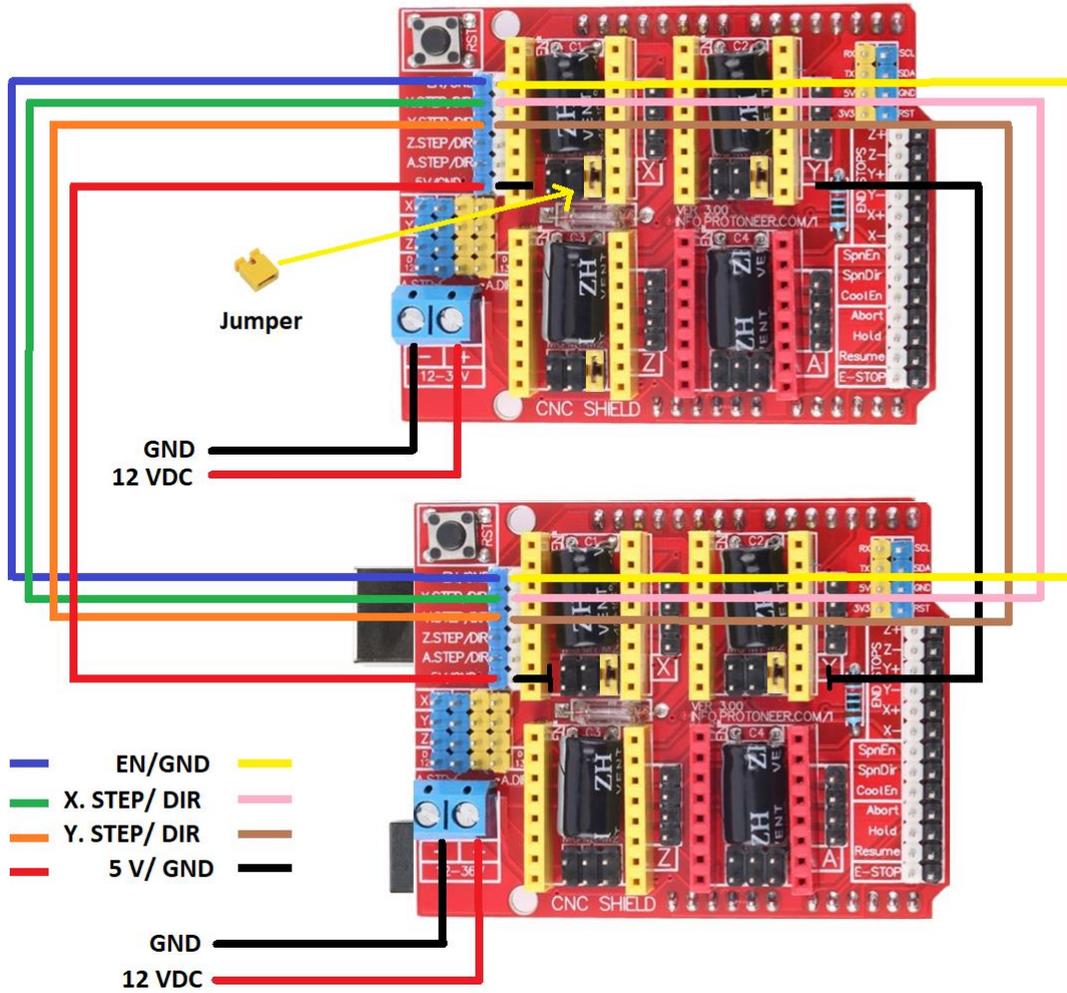
Conexiones eléctrica y clonación de los ejes X-Y



Pasos:

1. Se conecta la alimentación de la placa CNC Shield V3 a 12 VDC.
2. Se realiza conexión eléctrica entre los pines EN/GND, X. STEP/DIR, Y. STEP/DIR y 5 V/ GND de ambas tarjetas CNC Shield V3 para habilitar y clonar los ejes X-Y, este arreglo permitirá controlar 2 motores NEMA 17 para cada eje X-Y.

Colocación de Jumpers



Procedimiento:

Se instala un jumper por cada motor en la posición M2 para una resolución de paso de 1/16 STEP:

Modo 0	Modo 1	Modo 2
Bajo	Bajo	Alto

Los motores utilizados son de 200 pasos/ revolución (steps/rev), si se utiliza una resolución de 1/16 los pasos por revolución resultante son:

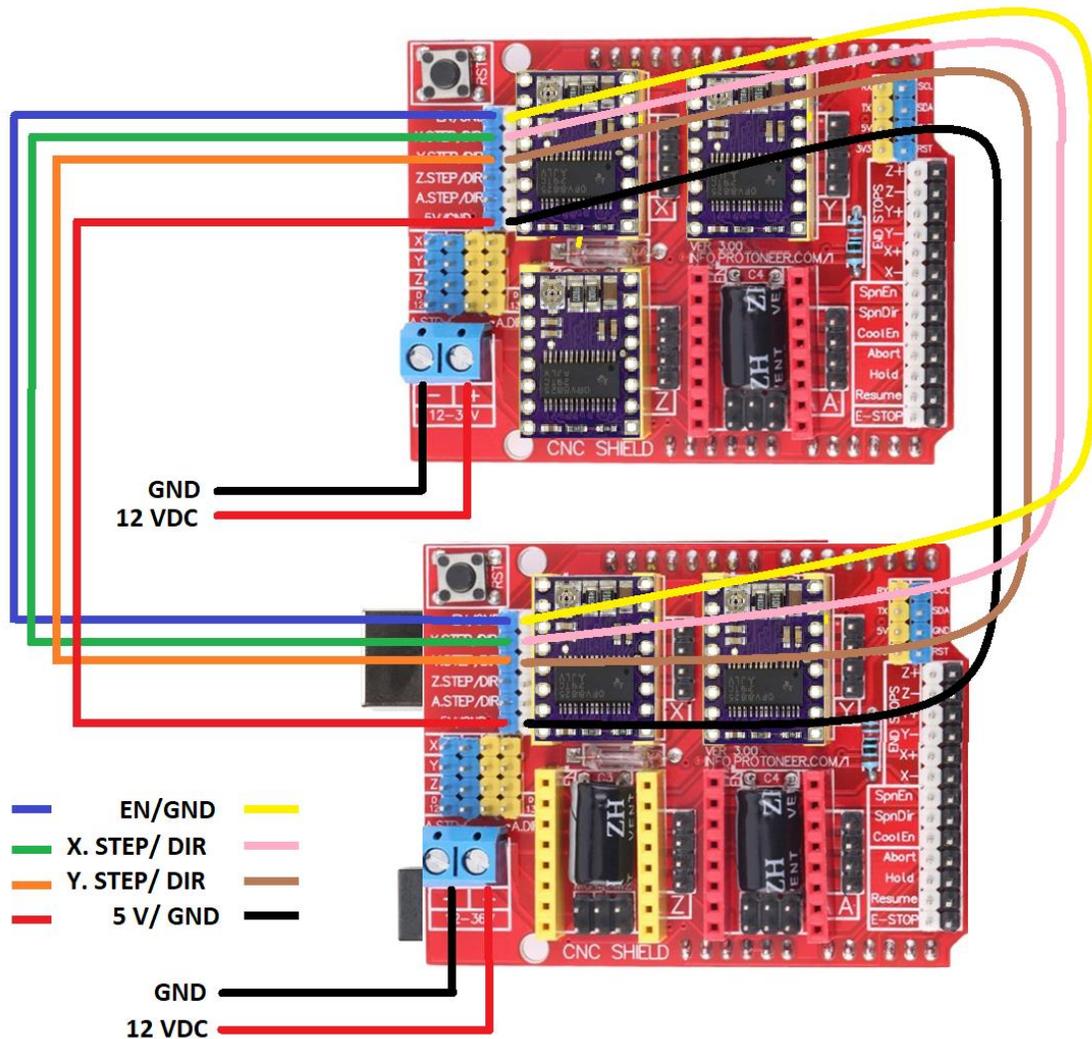
$$\text{Pasos/revolución} = (200 \text{ steps/rev}) / (1/16) = 3200 \text{ steps/rev}$$

Para calcular los pasos por milímetro se considera 8 mm/rev de acuerdo al tornillo Acme de 8 mm de diámetro de 4 hilos. Se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Pasos por milímetro} = \frac{3200 \text{ steps/rev}}{8 \text{ mm/rev}} = 400 \text{ steps/mm}$$

El valor de 400 steps/mm se configura en los parámetros del firmware GRBL a través del software Openbuilds CONTROL.

Colocación de DRIVERS DRV8825



Regulación de corriente del controlador DRV8825 a través de V_{xREF}

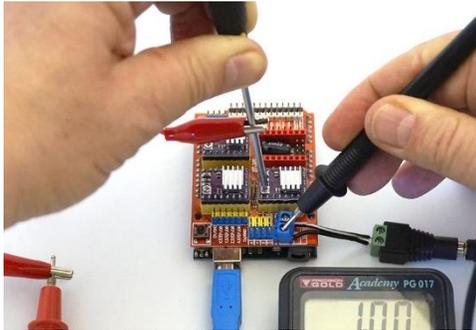
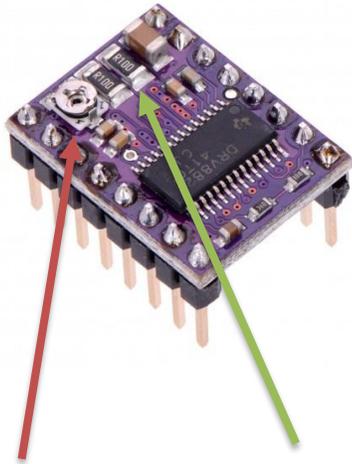


Figura T11: comprobación eléctrica para regulación de del voltaje de referencia.



Potenciómetro

Resistencias de
sensado

Figura T12: DRV8825.

Para regular la corriente que será entregada a los motores a pasos de debe regular el voltaje de referencia como se muestra en la imagen. Primeramente, como se observa en Figura T11, la tarjeta CNC Shield V3 debe estar conectada a 12 V, seguidamente se utiliza un multímetro en la función de tensión eléctrica, la punta COM se coloca en la terminal negativa y la punta positiva (de color rojo) se coloca en el potenciómetro de tornillo que se encuentra soldado en la placa DRV8825. Para facilitar el ajuste se utiliza un desarmador de cruz conectado a la punta positiva del multímetro para ejercer un giro en el tornillo (ver Figura T12) y con esto regular el voltaje V_{xREF} . El voltaje de referencia se calcula con la siguiente ecuación:

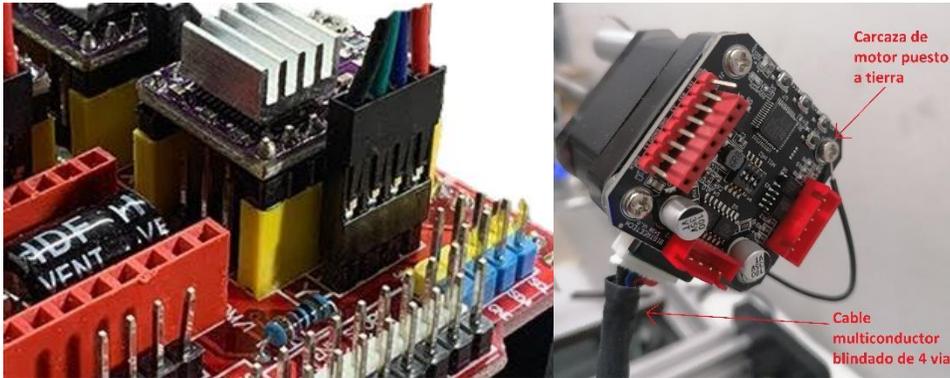
$$V_{xREF} = I_{CHOP} \times 5 \times R_{ISENSE}$$

Se considera una corriente máxima de 1.2 A para cada motor, R_{ISENSE} tiene un valor de 0.1 Ω correspondiente a la resistencia de sensado del controlador DRV8825. Sustituyendo los valores:

$$V_{xREF} = 1.2 A \times 5 \times 0.1 = 0.6 V$$

0.6 V debe ser valor de tensión medido con el multímetro al colocar las terminales entre negativo y el potenciómetro del controlador DRV8825.

Conexión de los motores a pasos



Se conecta los 5 motores a paso NEMA 17 con su respectivo controlador mediante un cable multiconductor de 4 vías blindado; la malla, mylar e hilo dren son conectados a tierra con en el fin de drenar los voltajes inducidos por la distorsión electromagnética que genera la fuente de alto voltaje.

12.3 Sensor de contacto o final de carrera

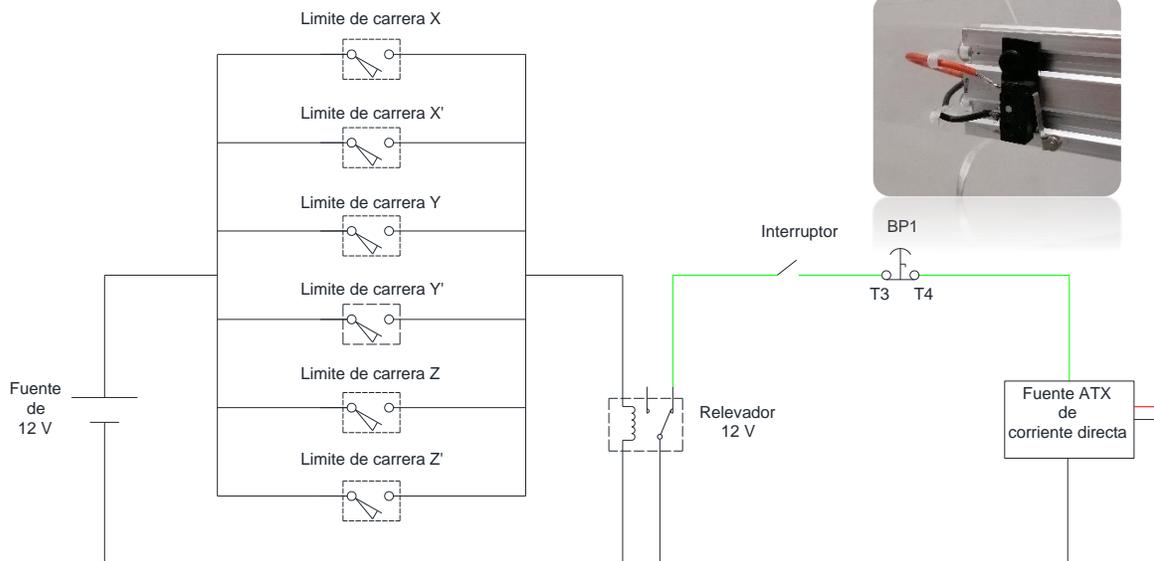


Figura T 13: esquema eléctrico de límites de carrera.

En la Figura T 13 se observa el esquema de conexión eléctrica de límites de carrera como elementos de protección del equipo. Los límites de carrera se instalan en las extremidades de la guía lineal V-slot o bien a una distancia del extremo ajustada de acuerdo al área de trabajo del equipo. La principal función de estos dispositivos es brindar una protección mecánica y eléctrica cuando se presenta un error por parte del operador o externo a él que lleve a trasladar los carros del equipo más allá del límite físicos que pueda resultar en una colisión entre dos elementos. El uso de estos elementos evita fracturas mecánicas y sobrecalentamiento en los motores, en caso de que la falla persista y no sea librada a tiempo puede resultar en la pérdida del motor, tornillos, piezas de soporte, entre otros.

12.4 Control de encendido y apagado de Fuente de Alto Voltaje

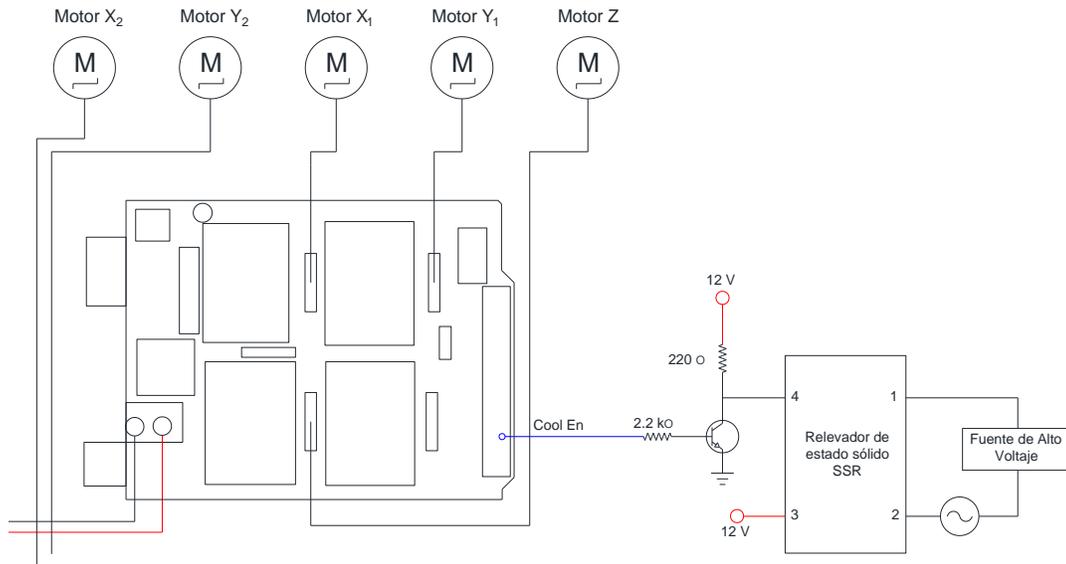


Figura T14: esquema de conexión de la señal de control para el encendido y apagado de fuente de alto voltaje.

El encendido y apagado de la fuente de alto voltaje se controla por una señal digital proveniente de la terminal Cool Enable de la tarjeta CNC Shield V3, dicha salida digital es mostrada en el esquema de la Figura T14, esta terminal es habilitada con el comando M02 y deshabilitada con M03, dicha señal es recibida por la base de un transistor TIP100 con configuración de emisor común, el SSR es conectado al colector del TIP100, la fuente de alto voltaje se encuentra conectada a corriente alterna del circuito separado del SSR.

12.5 Instrumentación y control

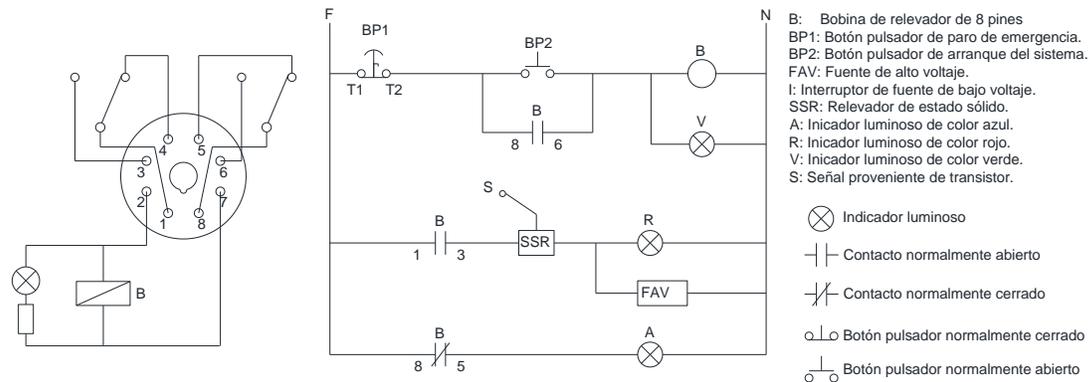


Figura T15: diagrama de control para la operación del equipo de electrohilado.

En el diagrama de control mostrado en la Figura T15, la celda superior se observa la conexión de lógica cableada entre los botones pulsadores, el relevador de 8 pines e indicadores luminosos para la señalización y control de equipo de electrohilado. Cuando la bobina "B" se encuentre desenergizada, en el gabinete de control sólo se mantiene encendido el indicador de color azul, como señal de equipo conectado a la red. El pulsador BP2 permite energizar la fuente de alto voltaje, la cual se encuentra en serie con las terminales 1 y 3 del relevador octal y el SSR, por lo cual también se necesita la señal de activación por código M para habilitarlo. El indicador rojo se encenderá siempre y cuando la fuente de alto voltaje se encuentre energizada. BP1 es el botón de paro de emergencia, el cual desconecta todo el sistema.

12.6 Materiales y equipo

El Nylon 6,6 utilizado es proporcionado por la compañía Plásticos y Compuestos, S.A. de C.V, marca Ultramid A3K de BASF. Se utiliza Ácido fórmico al 88% de Jalmek Científica S.A de C.V como solvente en las soluciones poliméricas. Una oblea de silicio de 0.2 mm de grosor es utilizada como sustrato aislado para la recolección de fibras.

Se utiliza una bomba KDScientific 100 para la dosificación de la solución en el proceso de electrohilado. Una placa calefactora de cerámica con agitación magnética es usada para la preparación de la solución. Una fuente de alto voltaje de hasta 20 kV es utilizada para cargar eléctricamente la solución.

12.7 Preparación de la solución

Se prepara una solución con 4 g Nylon 6,6 en 20 g de ácido fórmico. Los materiales agregados se mantienen en agitación contante por 2 h a 70 °C.

12.8 Procedimiento experimental

Una vez preparada la solución, ésta es cargada en una jeringa de plástico de un 1 mL con la aguja removida. La jeringa es conectada a una manguera de silicona de grado médico (Equipo para venocllisis) y seguidamente la solución es introducida a través de ésta comprobando la ausencia del paso de burbujas. Del otro extremo de la manguera una aguja metálica de 29G x 13 mm es conectada. La jeringa es conectada a la terminal positiva de la fuente de alto voltaje. Se utiliza como sustrato asilado eléctricamente una oblea de silicio de 0.41 mm de grosor. La distancia auxiliar entre el sustrato y el colector tipo alfiler situado en la parte inferior es de 1 mm en todos los experimentos. Los parámetros de operación que se mantienen constantes se describen en la Tabla 20.

Tabla 20: parámetros de operación constantes en el proceso de electrohilado.

Parámetros de operación	Distancia de trabajo (mm)		3
	Distancia auxiliar (mm)		1
	Velocidad de flujo (mL/h)		0.01
	Aguja	Material	Acero inoxidable
		Calibre	29G
	Colector	Material	Silicio
		Grosor (mm)	0.2
Permitividad eléctrica		2.2	

Las variables o factores de estudio y los respectivos tratamientos se resumen en la Tabla 21.

Tabla 21: nomenclatura, niveles y tratamiento de la experimentación.

Nomenclatura	Nivel de Tensión eléctrica (operación plena) [V]	Nivel de Velocidad de avance [mm/s]	Tratamiento
IIIA	1500	60	1
IIIB	1700	60	2
IIIC	1900	60	3
IIA	1500	50	4
IIB	1700	50	5
IIC	1900	50	6
IA	1500	40	7
IB	1700	40	8
IC	1900	40	9

El código para establecer el camino predefinido donde se depositará la fibra es cargado en el software OpenBuilds CONTROL, se realizan ajuste de posicionamiento cero del espacio de trabajo. En la ejecución del código, la fuente de alto voltaje será energizada y desenergizada al finalizar el proceso mediante código M.

12.9 Diseño de experimento (DDE)

1. Delimitación del problema.

Las fibras finas hechas por fuerza electrostática se han discutido, investigado y patentado desde finales del siglo XIX (Ghosal, Agatemor, Tucker, Kny, & Thomas, 2018). A la fecha, la técnica de electrohilado ha tenido diversas modificaciones con el fin de mejorar alguna de las características o propiedades de las fibras o redes electrohiladas. Una de las variantes a la técnica es el electrohilado de campo cercano (NFES por sus siglas en inglés) que se caracteriza por operar con distancias de trabajo relativamente cortas, entre 3 a 0.5 mm. Así también NFES tiene la particularidad de trabajar con niveles de voltaje más bajo, este rango de tensión eléctrica va de los 1600 a 200 V en corriente directa. Dentro de la variante de NFES se pueden encontrar otros subtipos que difieren por el tipo de colector, el tipo de corriente (CA o CD), la polaridad empleada, el material del sustrato y su conexión y el diseño del hilador. Para este proyecto en particular, se realiza el diseño de experimentos con el fin de determinar la

relación entre los factores de estudio que se definen en la siguiente sección con las propiedades de las fibras electrohiladas, como variable de respuesta. Los factores de estudio son definidos a través de una revisión sistemática de los parámetros de operación y solución, así como de las configuraciones experimentales usadas o propuestas en artículos de NFES, LV-NFES, DW-NFES y de manera más puntual aquellos que utilizan un electrodo afilado como colector para la redirección del campo eléctrico, además de un sustrato dieléctrico aislado eléctricamente en donde se depositan las fibras. Uno de los estudios más apegados al proyecto en cuanto a la configuración experimental propuesta es el realizado por Zheng y otros (2021), en donde generan redes electrohiladas 3D mediante el apilamiento de capa por capa con una configuración que consiste en un electrodo guía como ánodo para superar las interferencias eléctricas ocasionadas por las fibras ya depositadas. En este estudio se compara dos configuraciones, una en donde se utiliza un plato como colector aterrizado y en el otro un electrodo afilado como colector aterrizado en conjunto con un sustrato aislado de Si de 0.2 mm de grosor; de acuerdo a las etapas de movimiento, tanto hilador como electrodo guía se mantienen fijos siendo el sustrato de Si la parte móvil en las direcciones X-Y. Cuando la configuración experimental asigna al sustrato como la parte móvil, pone a discusión si esto genera algún efecto negativo sobre la calidad en la orientación de las fibras, de acuerdo con el estudio realizado por You y otros (2017), una configuración convencional en donde el sustrato es el elemento móvil, tiende a generar una zona de retraso entre el punto deseado y el punto real de deposición, que da como resultado alteraciones en el entramado resultante, es decir la deposición no ocurre en el camino predefinido por el equipo, en consecuencia se generan patrones irregulares y una red poco íntegra y repetible; por tanto este trabajo de tesis propone el uso de un pin afilado aterrizado móvil debajo de un sustrato de PE, en esta propuesta tanto el sustrato como el hilador se encuentran fijos, lo cual presenta una distancia de trabajo variable a lo largo del todo el proceso, en donde la interacción del campo eléctrico también varía de acuerdo a la distancia. Por otro lado también está el estudio realizado por Xu y otros (2014) en donde comparan tres métodos, uno convencional comentado anteriormente, un con cambio de polaridad eléctrica entre el hilador y el colector y como último un configuración con colector tipo electrodo afilado con etapas de movimiento similar a las propuestas por Zheng y otros (2021); en este estudio manejan como variable de respuesta el paso entre fibra

alcanzada por los tres métodos, de acuerdo a los resultados método con electrodo afilado permite un paso entre fibra menor en comparación con los otros dos métodos

2. Determinación de los factores de estudio y variables de control.

En la Tabla 22 se presentan los factores de estudio, controlados y no controlados para el desarrollo del diseño de experimentos.

Tabla 22: factores de estudio y variables de control.

Factores controlables	Concentración (wt%)	
	Tensión superficial (N/m)	
	Tensión eléctrica de arranque (V)	
	Distancia auxiliar (mm)	
	Velocidad de flujo (mL/min)	
	Distancia de trabajo (mm)	
	Aguja	Material
		Diámetro interno (mm)
	Colector	Material
Grosor		
Permitividad eléctrica		
Factores no controlados	Temperatura (°C)	
	Humedad relativa (%)	
Factores de estudio	Velocidad de avance (mm/s)	
	Tensión eléctrica (V)	
Variables de respuesta	Diámetro de fibra electrohilada (nm)	
	Deposición de fibra	

12.10 Técnicas de caracterización

La morfología de las nanofibras se caracterizó por Microscopía Electrónica de Barrido utilizando un SEM JEOL JSM 5900 operado a 20 KV del centro de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla. La espectroscopia FTIR se llevó a cabo en un Tensor 37, Bruker con una resolución de 1 cm^{-1} , con un tiempo de escaneo de 32 scans en un rango de $4000\text{ a }400\text{ cm}^{-1}$.

13. [Resultados](#)

13.1 [Análisis de campo eléctrico en COMSOL Multiphysics](#)

Geometría de estudio

En esta sección se considera 3 elementos que intervienen en la generación y manipulación del campo eléctrico durante el proceso de electrohilado. Estos elementos son el hilador o jeringa, el colector tipo alfiler que se encuentra en la parte inferior y el sustrato que se encuentra en la parte intermedia entre los dos primeros, el cual recibirá la fibra eyectada desde el hilador. En la Figura 12 se observa la distribución física, siendo la distancia de trabajo de 3 mm. De acuerdo a los materiales, se utiliza acero inoxidable en jeringa y colector afilado y para el sustrato se utiliza silicio.

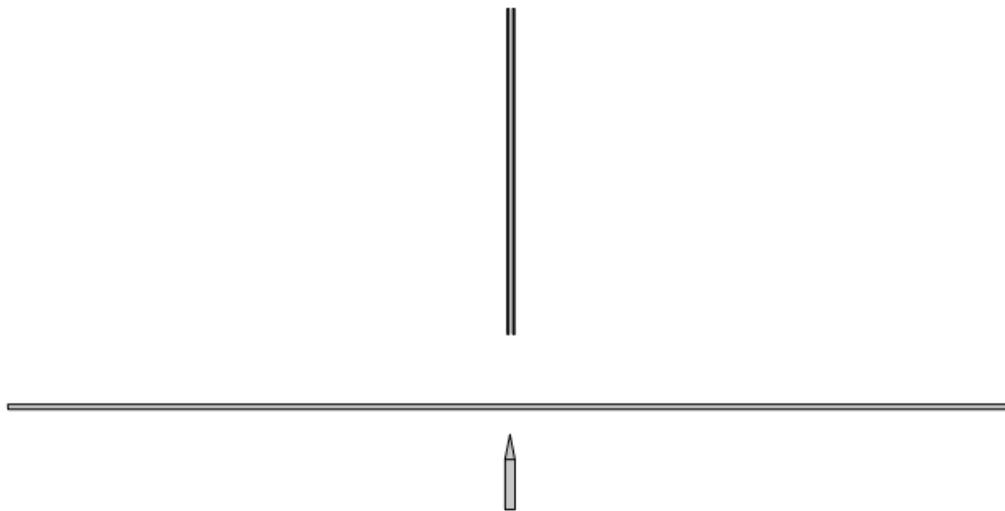


Figura 12: geometría de estudio para simulación de campo eléctrico.

Potencial eléctrico [V] y Campo eléctrico [V/m]

El campo y el potencial eléctrico entre el hilador y el colector con y sin el electrodo de punta afilada se ha simulado utilizando el software COMSOL Multiphysics. La distribución del campo eléctrico es un factor importante debido a que está ligado con el comportamiento del chorro o jet en el proceso de electrohilado, en la Figura 13 se observa la distribución de líneas de campo eléctrico y la escala de colores con unidad de Volt; el resultado de la configuración experimental se simula con una distancia de trabajo (de hilador a sustrato) de 3 mm con disposición concéntrica entre ambos elementos y una tensión eléctrica de 1500 V.

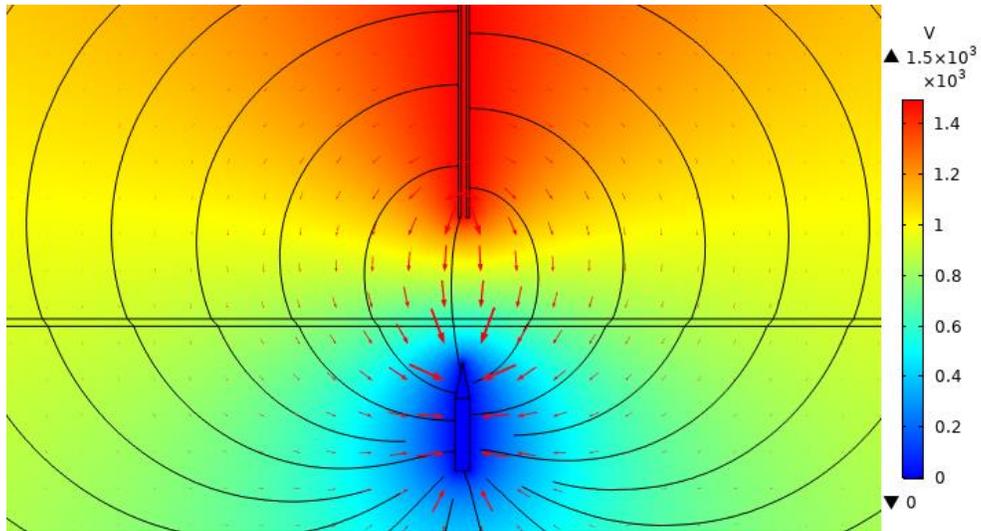


Figura 13: potencial eléctrico (V) y campo eléctrico entre hilador y colector tipo alfiler.

En la configuración con colector tipo alfiler, las líneas de campo eléctrico convergen hacia el electrodo afilado, creando así un sumidero que atrae la solución polimérica cargada positivamente, a diferencia del campo divergente creado por un colector plano o tipo plano como se observa en la Figura 14, así mismo como Zheng y otros (2021), el contar con un electrodo afilado permite la disipación de la carga estática residual que conservan las fibras ya depositadas de manera más rápida, evitando repulsiones a las fibras que están siendo atraídas, por lo que facilita que las nanofibras se deposite capa por capa.

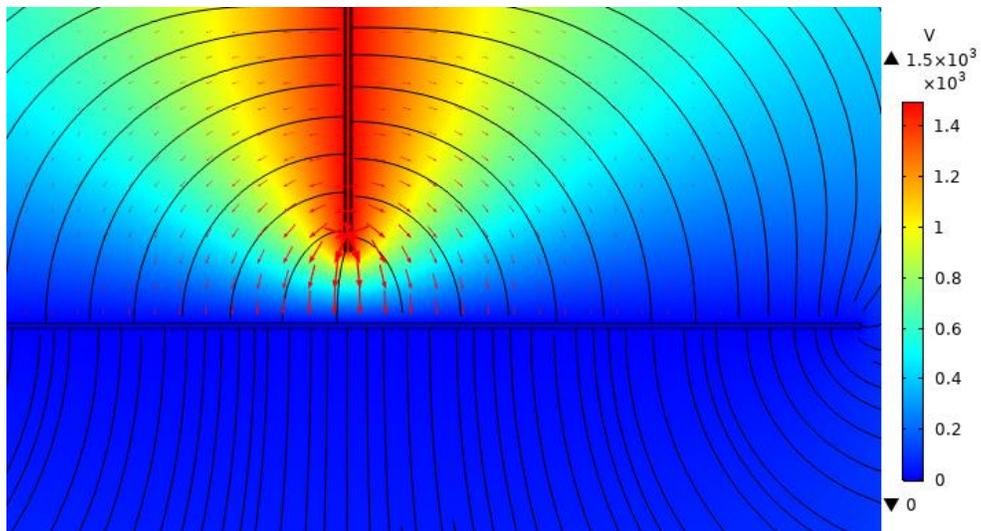


Figura 14: Potencial eléctrico (V) y líneas de campo eléctrico entre hilador y colector tipo plano.

En la Figura 15 se observa la simulación del campo eléctrico mediante curvas de nivel, en donde se visualiza una mayor intensidad del campo en las cercanías o partes afiladas tanto del hilador como del colector tipo alfiler. Realizando una comparación entre la Figura 15 y Figura 16, se puede observar que es posible una intensidad de campo eléctrico mayor con la configuración de colector tipo alfiler (zona cálida de acuerdo a la barra de colores), también se puede deducir que mientras más cercano se encuentre el colector afilado a la parte inferior del sustrato de silicio mayor será la magnitud del campo en ese punto.

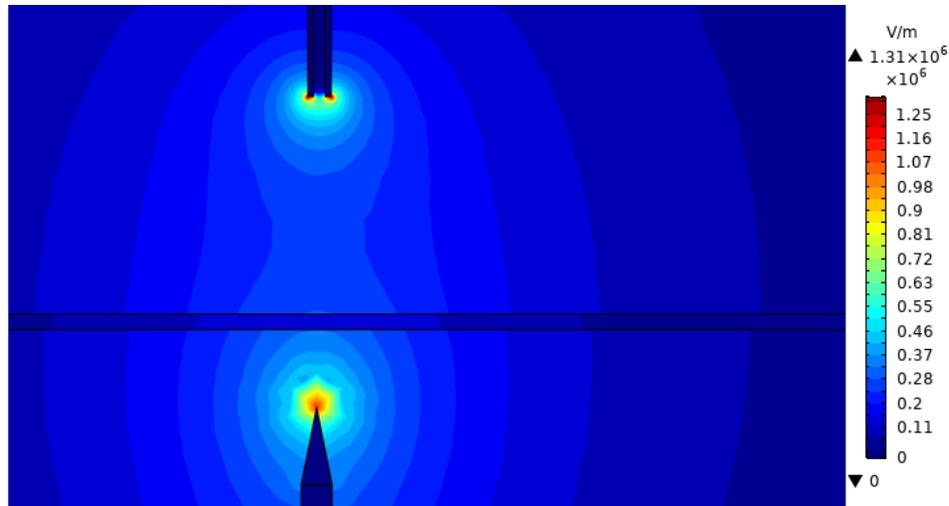


Figura 15: curva de nivel: campo eléctrico (V/m), configuración con colector tipo alfiler.

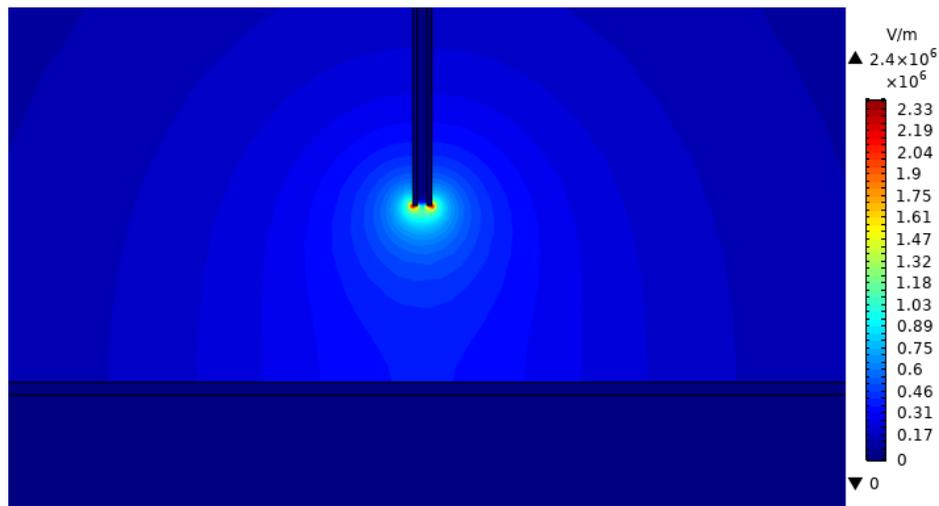


Figura 16: curvas de nivel de campo eléctrico (V/m) de la configuración de electrohilado de campo cercano con colector tipo plato o plano.

13.2 Imágenes fotográficas

En la Figura 17 se observan la deposición gradual de las fibras electrohiladas por apilamiento de capa por capa. El tiempo total del proceso para la obtención de cinco capas fue de 11 h. A primera vista es posible ver la dirección cruzada de colocación de las fibras y como la película se vuelve más gruesa conforme se apilan las capas.

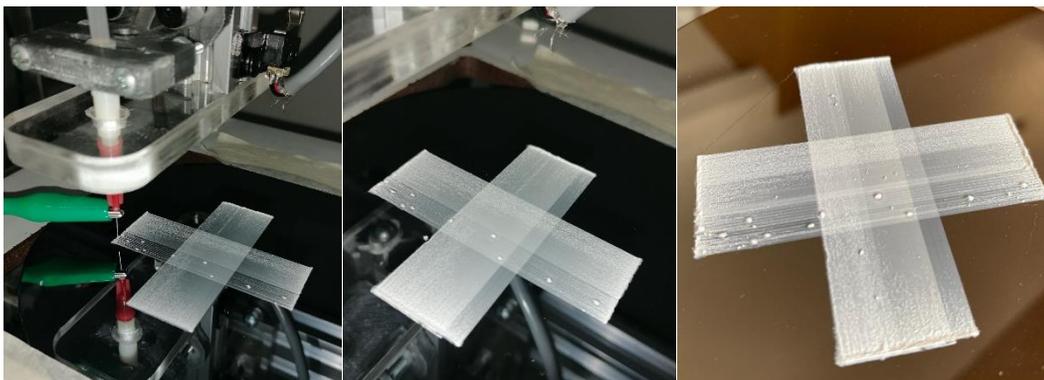


Figura 17: fotografías de películas electrohiladas a 1500 V y 60 mms⁻¹, (a) una capas, (b) dos capas y (c) cinco capas.

13.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM por sus siglas en inglés)

Las condiciones de humedad y temperatura con las que se realizaron cada una de las muestras se presentan en la Tabla 23 con su correspondiente nomenclatura.

Tabla 23: nomenclatura de películas electrohiladas de 5 capas, datos de temperatura y humedad.

Nomenclatura	Tensión eléctrica (plena operación) [V]	Velocidad de avance [mm/s]	Temperatura ambiente [°C]	Humedad relativa [%]
IIIA	1500	60	31.2	54
IIIB	1700		34.8	51
IIIC	1900		33	51
IIA	1500	50	33	54
IIB	1700		28.5	60
IIC	1900		28.7	42
IA	1500	40	31	58
IB	1700		31.7	55
IC	1900		32	59

Los valores en nanómetros fueron calculados mediante el programa de análisis de imagen ImageJ®. En la Figura 18 se observan dos de las quince mediciones para obtener el diámetro promedio para la película IIB.

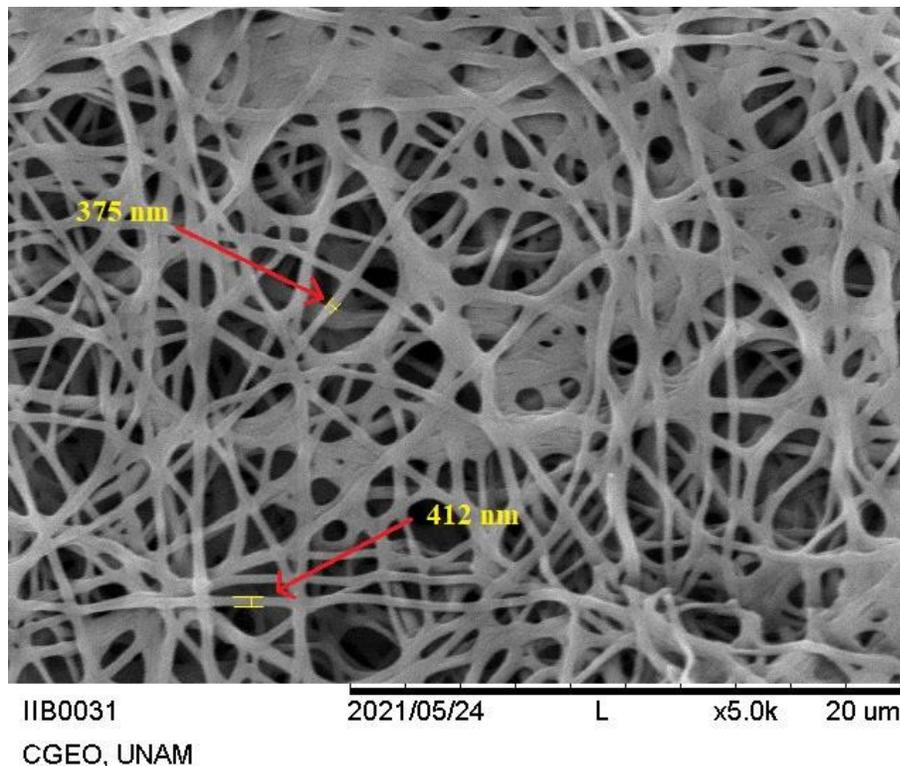


Figura 18: imagen SEM de película IIB.

En la Tabla 24 se presentan los diámetros promedios de las fibras electrohiladas de acuerdo a los niveles de tensión eléctrica y velocidad de avance.

Tabla 24: diámetros promedios de fibras electrohiladas obtenidas.

Velocidad de avance	Diámetro promedio (nm)		
	Tensión eléctrica		
	1500 V	1700 V	1900 V
40 mm/s	843	714	845
50 mm/s	679	364	402
60 mm/s	402	498	656

De acuerdo a los datos en la literatura, Navarro y otros (2014) obtienen un diámetro promedio de 237 ± 30 nm correspondiente a un porcentaje de cristalinidad de 31.52 ± 0.011 obtenidos con una concentración baja de 4g de Nylon 6,6 en 20 g de ácido fórmico, comparado con los diámetros obtenidos, en todos los tratamientos se obtiene un valor de diámetro mayor,

siendo el más bajo el de 364 nm a 50 mm/s con una tensión eléctrica de 1700 V. Por otro lado, analizando la Tabla 24, con un nivel de tensión eléctrica de 1700 V se obtuvieron diámetros menores del mismo modo que con una velocidad de avance de 50 mm/s; la razón por la que electrohilar a 1900 V se obtuvieron diámetros significativamente mayores se debe a que la aceleración del chorro del polímero es demasiado alta con respecto a la velocidad de avance del equipo, por lo que las fibras experimentan una menor fuerza de arrastre y, por tanto, un menor estiramiento mecánico. En la Figura 19 se observan las imágenes SEM de los 9 tratamientos realizados, para las muestras a 1700 V con 40 mm/s y 1900 V con 60 mm/s, a magnificación X100 se observa mayor orientación de las fibras conforme a las etapas de movimientos.

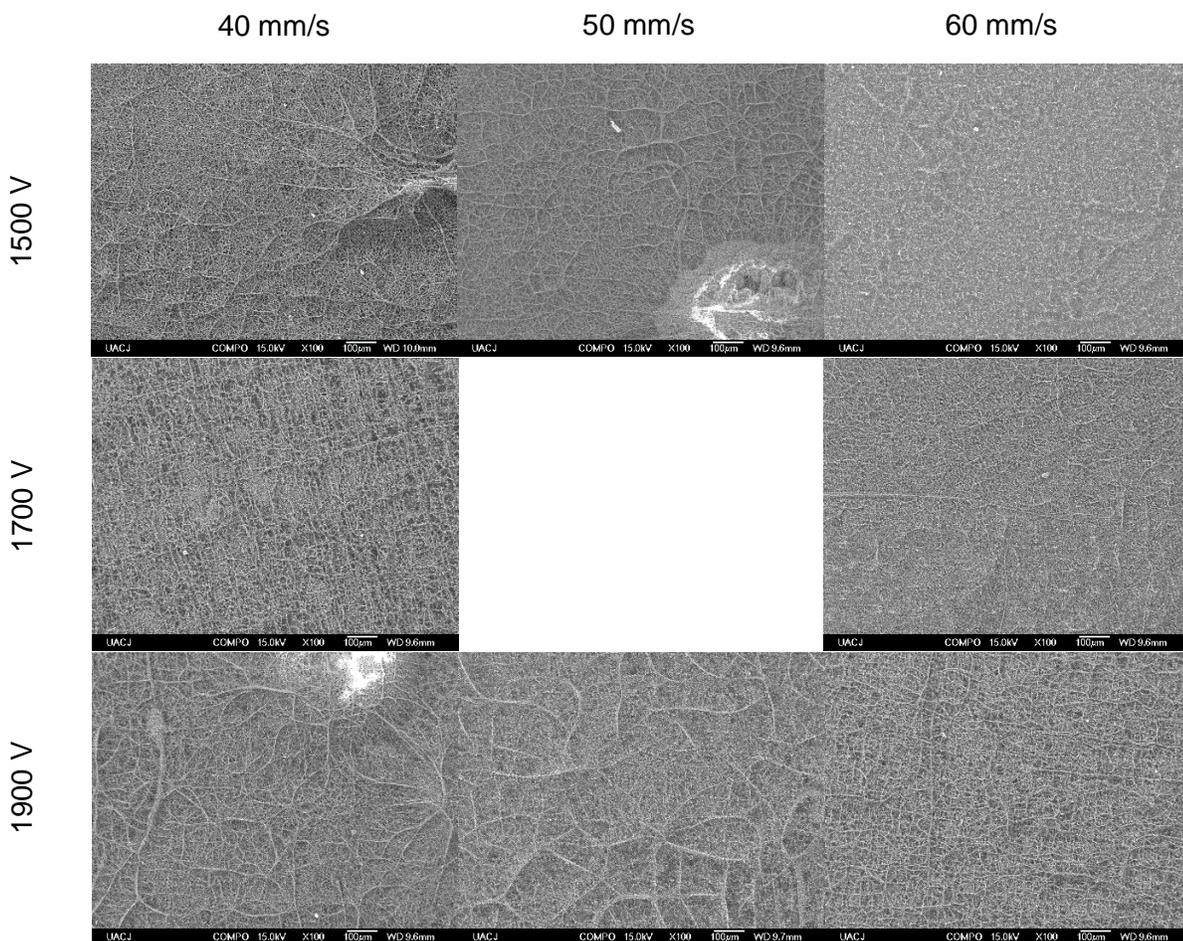


Figura 19: Morfología de las fibras de Nylon 6,6 electrohiladas obtenidas por configuración propuesta de electrohilado de campo cercano, magnificación X100.

En la Figura 19 se observan las fibras electrohiladas con una magnificación de X100 en donde se visualiza la distribución uniforme de las fibras, se ordenan las imágenes de SEM de acuerdo con el voltaje y velocidades de avance. Para la película electrohilada a 1700 V con 40

mm/s se alcanza a observar la orientación detalles se observan más claramente. En la Figura 20 y Figura 21 se observan con mayor detalles la orientación de las fibras para las películas IIB y IIIC respectivamente.

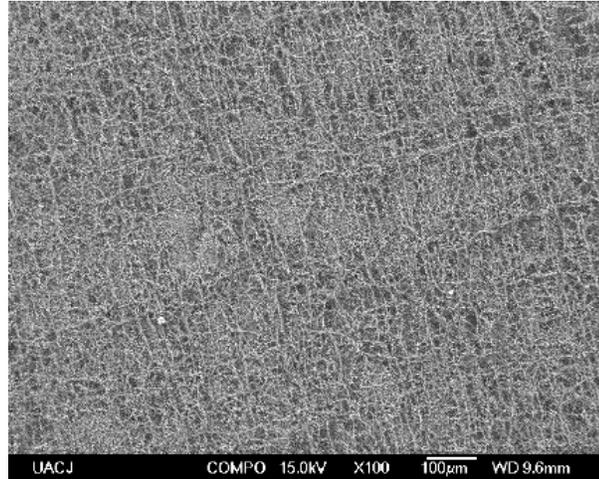


Figura 20: Características morfológicas de película electrohilada a 1700 V, 50 mm/s, 0.01 mL/h, 29G, 3mm de distancia de trabajo y 4 g Nylon 6,6/ 20 g ácido fórmico.

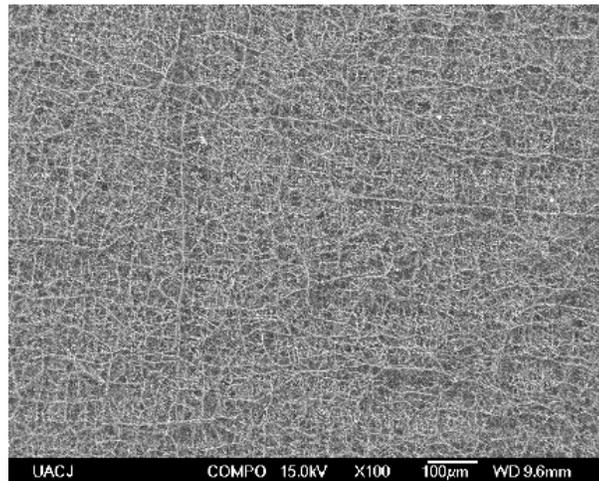


Figura 21: Características morfológicas de película electrohilada a 1900 V, 60 mm/s, 0.01 mL/h, 29G, 3mm de distancia de trabajo y 4 g Nylon 6,6/ 20 g ácido fórmico.

En la Figura 22 se observa las fibras electrohiladas obtenidas con una magnificación de X1000, en donde se visualizan con mayor detalle la orientación de las fibras, en todos los tratamientos se observa aleatoriedad de las fibras depositadas, esta característica también se encuentra relacionada con la carga estática residual que conservan las fibras ya depositadas y que se oponen a la colocación de nuevas fibras, tal carga aumenta conforme se apilan más número de capas.

En la Figura 22 se presentan las diferentes películas electrohiladas, analizando la orientación y alineación de las fibras, las películas IIA, IIC y IIIB son las que conservaron en mayor medida los patrones de movimiento cruzados a 90°, comparando las películas IIA y IIC, se puede observar que el aumento de la tensión eléctrica deposita fibras de forma rizada con mayores radios de curvatura a lo largo de una trayectoria recta (líneas verdes marcadas). En cuanto a la película IIIB, mantiene tenuemente la orientación cruzada en comparación con el resto de las películas.

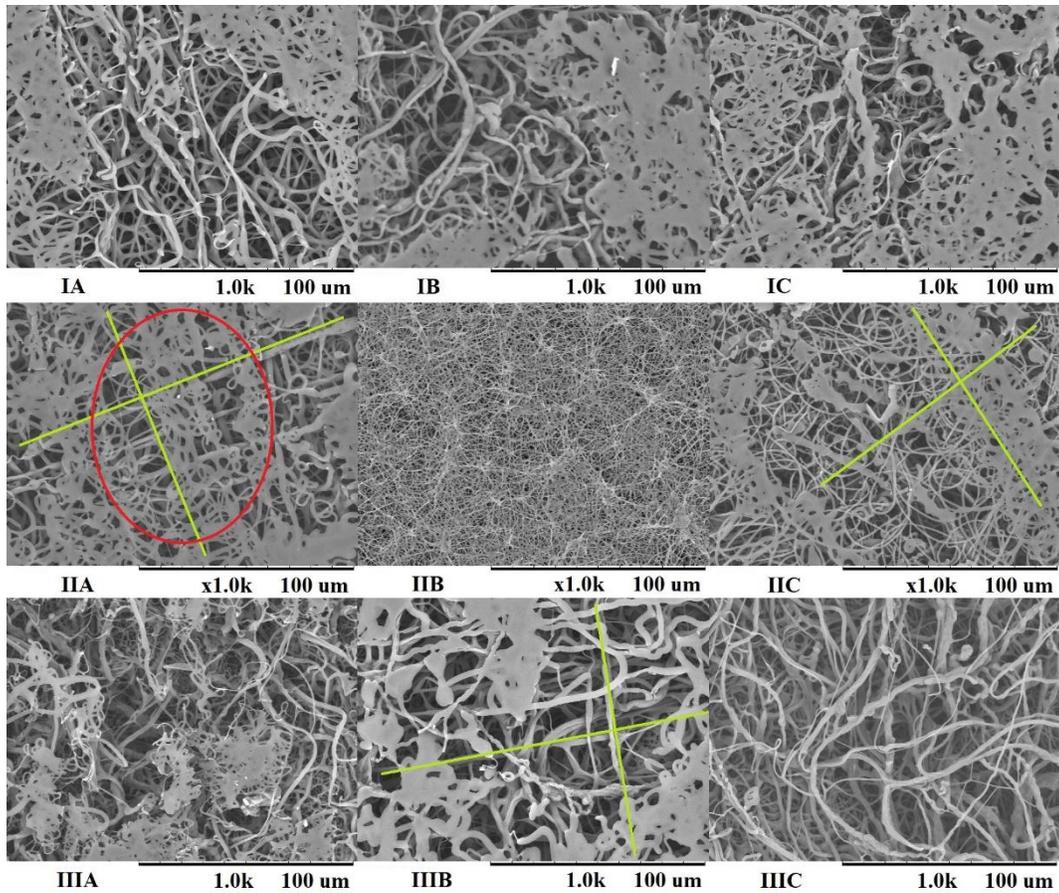


Figura 22: imágenes SEM de los 9 tratamientos realizados a magnificación x1.0 k.

En la Figura 23 se observan las fibras de Nylon 6,6 obtenidas con una magnificación de X10,000, se visualiza claramente que las fibras obtenidas a 1700 V y 50 mm/s son las de menor diámetro, en los tratamientos restantes se presenta una variación mayor en los diámetros calculados, en el caso de la película obtenida a 1900 V y a 40 mm/s se estima un diámetro mínimo de 335 nm y un valor máximo de 856 nm.

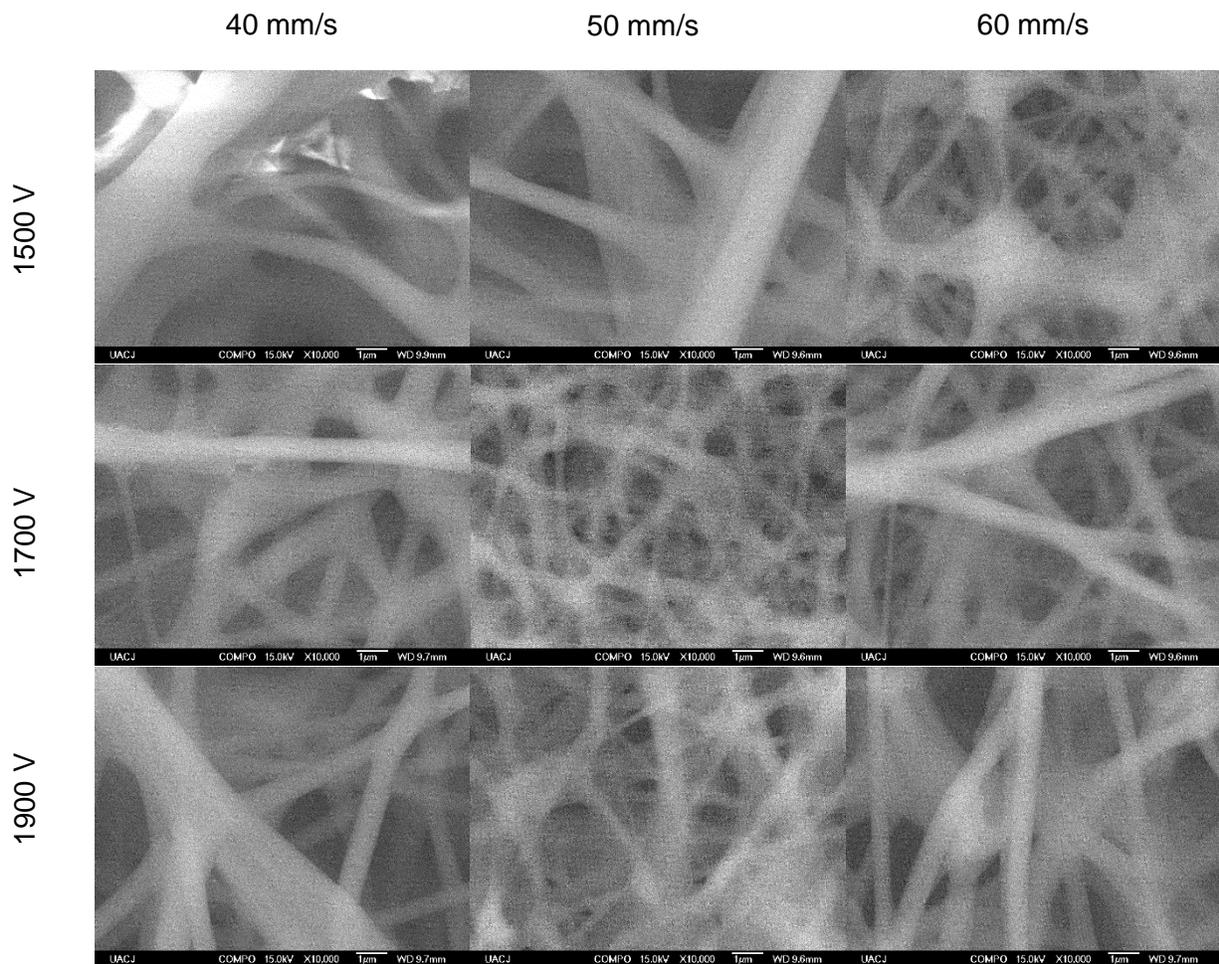


Figura 23: Morfología de las fibras de Nylon 6,6 electrohiladas obtenidas por configuración propuesta de electrohilado de campo cercano, magnificación X10,000.

En la Figura 24 se observa el aspecto superficial de la película electrohilada IIB y IIIC, las cuales presenta fibras tanto lisas como corrugadas, éstas últimas de acuerdo a la literatura se deben a la alta humedad presente en el ambiente, de acuerdo a la Tabla 23 se presentó una humedad relativa del 60% para IIB y del 51% para IIIC, alta humedad influye en la velocidad

de solidificación al posponer la evaporación del solvente con un polímero hidrofílico como el Nylon 6,6 (Mailley, 2018), por lo que es observable que algunas de las fibras electrohiladas se encuentren corrugadas y fusionadas entre si, así mismo surcos o ranuras longitudinales son observables para la muestra IIIC (ver Figura 24 (b)).

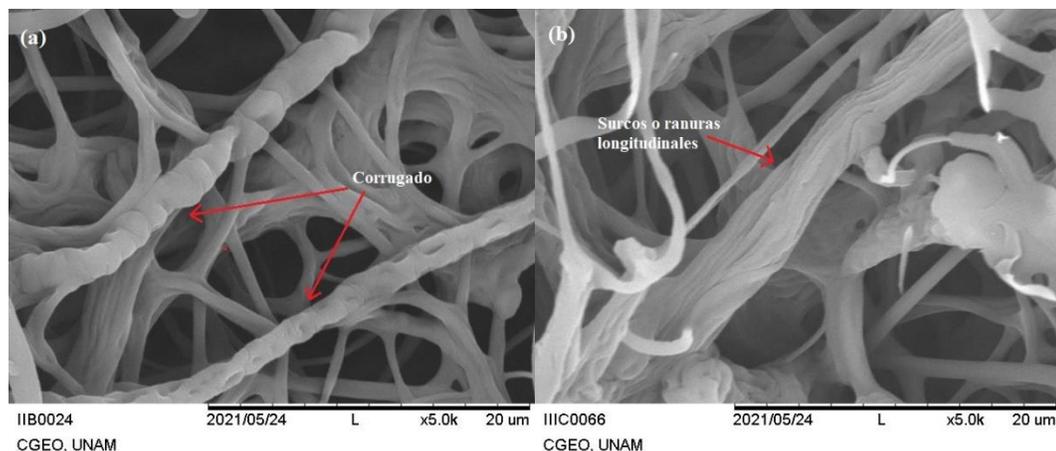


Figura 24: características morfológicas de película electrohilada IIB (izquierda) y IIIC (derecha), ambas a 0.01 mL/h, 29G, 3mm de distancia de trabajo y 4 g Nylon 6,6/ 20 g ácido fórmico.

Por otro lado, el porcentaje de área de la fibra se calculó utilizando el software ImageJ® (consultar ANEXO B), los datos se presentan en la Tabla 25, se deduce que a mayor velocidad de desplazamiento se obtienen menor porcentaje de área de fibra y diámetros menores; la combinación de estas dos propiedades con sus valores más bajos tiene alguna relación con el aumento de cristalinidad, debido a que los picos cristalinos $\sim 1535\text{ cm}^{-1}$ y $\sim 1633\text{ cm}^{-1}$ de las muestras IIIA y IIIB tienen los valores más bajos de porcentaje de área de fibras y diámetros.

Tabla 25: porcentaje de área de fibras y diámetros promedios.

Película	Área de fibras (%)	Diámetro promedio de fibras (nm)
IIIC	51.103	656
IIIA	53.537	402
IIIB	61.575	498
IB	62.242	714
IA	63.164	843
IIB	63.221	364
IIA	64.572	679
IIC	64.631	402
IC	69.056	845

13.4 Diseño de Experimentos

13.4.1 Diseño Factorial 3²

Se realiza el siguiente diseño para estudiar los efectos de los factores sobre las variables de respuesta. Los efectos estudiados son el diámetro de nanofibras expresados en nanómetros, el porcentaje de área de fibras y los picos cristalinos. En la Tabla 26 se observa los datos experimentales utilizados para el análisis factorial a partir de 9 tratamientos.

Tabla 26: Datos experimentales utilizados en Diseño Factorial 3².

Velocidad de avance	Tensión Eléctrica	Diámetro
1500	40	843
1500	50	679
1500	60	402
1700	40	714
1700	50	364
1700	60	498
1900	40	845
1900	50	402
1900	60	656
1500	40	1436
1500	50	1198
1500	60	979
1700	40	957
1700	50	319
1700	60	1416
1900	40	790
1900	50	892
1900	60	911.8

Regresión factorial general: Diámetro vs. Tensión Eléctrica [V], Velocidad de avance [mm/S]

Información del factor

En la Tabla 27 se presenta los niveles para los factores de tensión eléctrica y velocidad de avance, esta tabla es informativa para la fácil comprensión de análisis.

Tabla 27: factores de estudios y sus niveles.

Factor	Niveles	Valores
--------	---------	---------

Tensión Eléctrica	3 1, 2, 3
Velocidad de avance	3 1, 2, 3

Análisis de Varianza

En la Tabla 28 se incluye el valor p de los 2 efectos principales y su interacción, dichos valor están por encima del valor de significancia $\alpha = 0.05$, por lo que no son estadísticamente significativos.

Tabla 28: análisis de varianza.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	812881	101610	0.84	0.589
Lineal	4	404604	101151	0.84	0.533
A	2	152342	76171	0.63	0.553
B	2	252262	126131	1.05	0.390
Interacciones de 2 términos	4	408277	102069	0.85	0.529
A*B	4	408277	102069	0.85	0.529
Error	9	1082861	120318		
Total	17	1895742			

Resumen del modelo

En la Tabla 29 se muestra la desviación estándar "S", dicho magnitud resulta alta por lo que indica que el modelo cumple muy poco con los supuesto del modelo.

Tabla 29: resumen del modelo para Analizar diseño de superficie de respuesta.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
346.869	42.88%	0.00%	0.00%

Ecuación de regresión

En la Tabla 30 se presenta la representación algebraica de la línea de regresión de la Figura 26.

Tabla 30: ecuación de regresión.

$\begin{aligned} \text{Diámetro} = & 794.5 + 128 A_{11} - 83 A_{21} - 45 A_{31} + 136 B_{11} - 152 B_{21} + 16 B_{31} + 80 A^*B_{11} \\ & + 168 A^*B_{12} - 248 A^*B_{13} - 12 A^*B_{21} - 218 A^*B_{22} + 230 A^*B_{23} \\ & - 68 A^*B_{31} \\ & + 50 A^*B_{32} + 19 A^*B_{33} \end{aligned}$
--

De acuerdo al diagrama de Pareto en la Figura 25, ninguno de los efectos es estadísticamente significativos debido a que no cruzan la línea de referencia, evaluado el nivel

de las barras, el factor de velocidad de avance tiene a tener mayor significación que los otros dos efectos restantes.

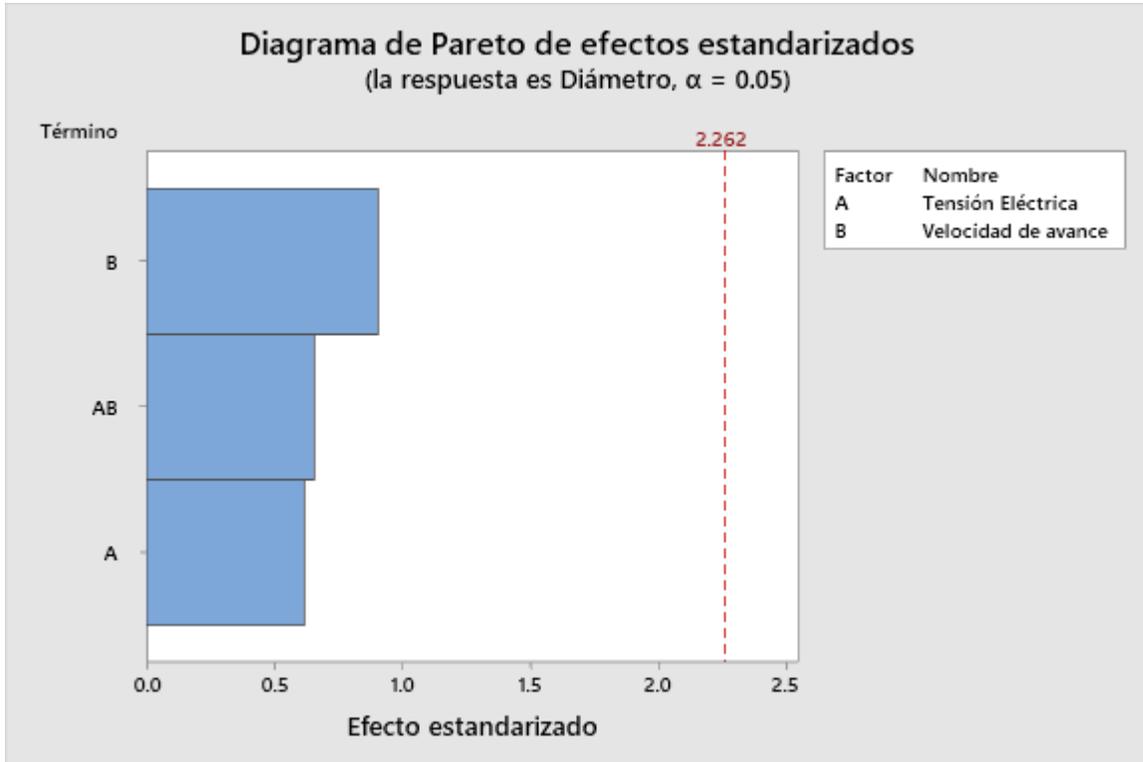


Figura 25: diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

De acuerdo con las gráficas de residuos de la Figura 26, el histograma presenta asimétrica y valores atípicos en los extremos, sin embargo, la cantidad de datos es pequeña para una fiable interpretación de este gráfico. Pasando a la gráfica de probabilidad normal, se observa que los residuos presentan una distribución normal. Por otro lado, en la gráfica de Residuos vs ajustes, se visualizan varios valores atípicos y varianza no constante. Por último, de acuerdo a la gráfica de Residuos vs orden, los residuos se presentan aleatoriedad a lo largo de la línea central por lo que resultan ser independientes entre sí.

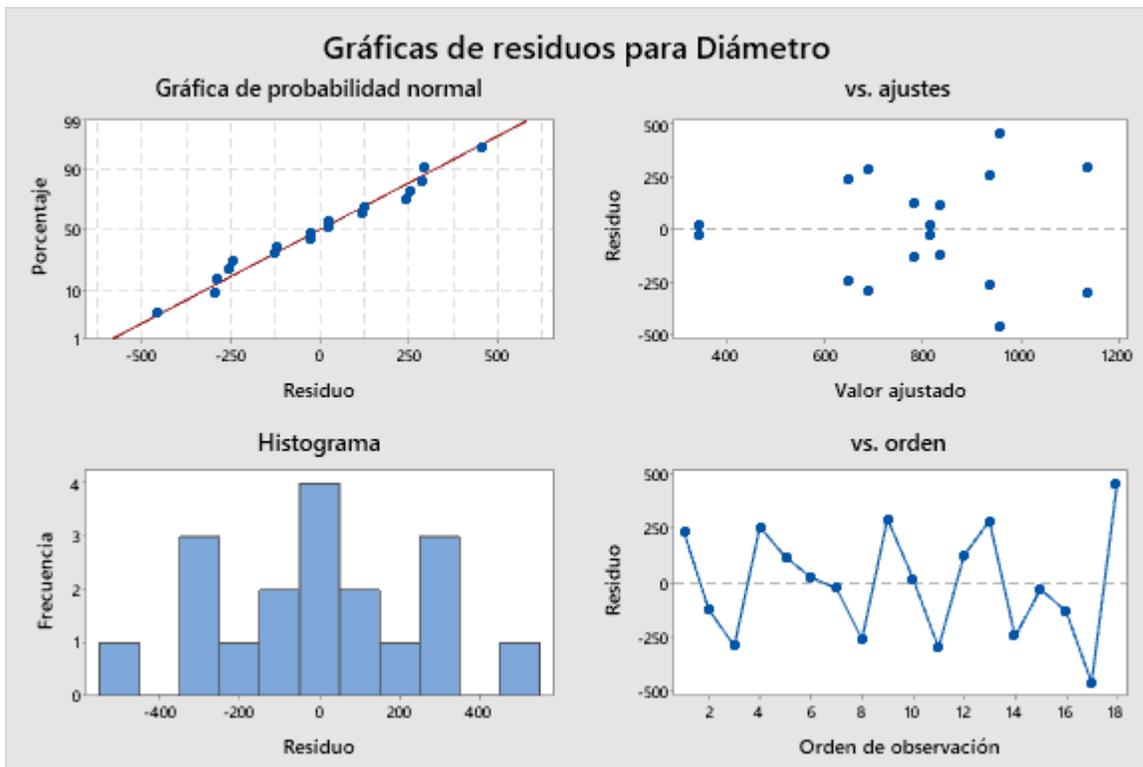


Figura 26: Gráficas de residuos para el diámetros de las fibras electrohiladas.

13.5 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Se analizan los espectros de FTIR para determinar las intensidades de los grupos funcionales en las películas electrohiladas de Nylon 6,6, en la Figura 27 se observan los espectros FTIR de los 9 tratamientos estudiados, en donde la tensión eléctrica y la velocidad de desplazamiento son los variables de estudio y el resto de las condiciones se mantienen constantes.

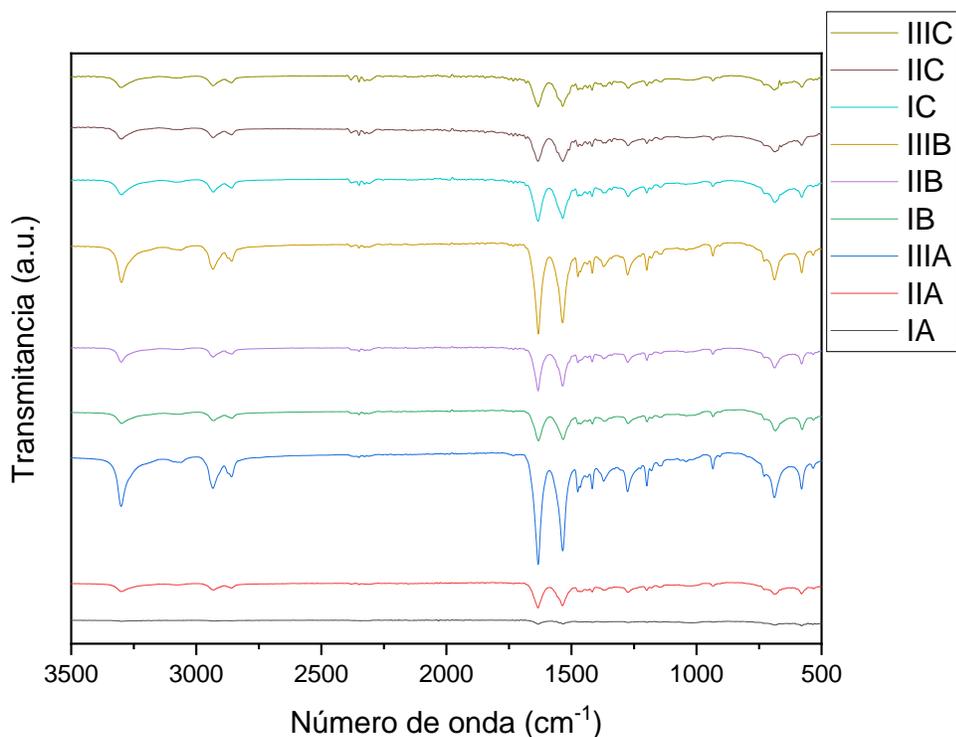


Figura 27: Espectros FTIR de las películas electrohiladas de Nylon 6,6.

En la Figura 28 se muestran las bandas características del Nylon 6,6, el pico cristalino por estiramiento de Amida (C-C=O) en $\sim 935 \text{ cm}^{-1}$; la deformación N-H y el estiramiento C-N de la amida II en $\sim 1535 \text{ cm}^{-1}$; estiramiento C=O de la Amida I en $\sim 1633 \text{ cm}^{-1}$ y el estiramiento N-H en $\sim 3300 \text{ cm}^{-1}$, en la Tabla 31 se resumen los grupos funcionales del Nylon 6,6 identificados.

Tabla 31: picos principales observados en las películas electrohiladas.

Número de onda [cm^{-1}]	Asignación
3300	Estiramiento N-H
2933	Estiramiento asimétrico C-H (CH_2)
2860	Estiramiento simétrico C-H (CH_2)
1633	Estiramiento C=O, Amida I.
1535	Estiramiento de C-N y deformación angular de C=O-N-H, Amida II.
1474	Deformación de C-H (CH_2).
1275	Vibración en Amia III (C-N).
1200	Pico cristalino, deformación angular simétrica fuera del plano (wagging), Amida II.
935	Pico cristalino, estiramiento de Amida (C-C=O).

El Nylon 6,6 tiene dos picos cristalinos característicos en $\sim 1535 \text{ cm}^{-1}$ y $\sim 1633 \text{ cm}^{-1}$ (Navarro-Pardo, y otros, 2013), los cuales se señalan en la Figura 29, en la muestra IIIA (60 mm/s, 1500 V) y IIIB (60 mm/s, 1900 V) los picos llegan a ser más intensos en comparación con los otros espectros. La tendencia que se puede observar al analizar los espectros muestra picos más intensos conforme se aumenta la velocidad de avance, sin embargo, no hay una tendencia lineal conforme se varían los parámetros de tensión eléctrica y velocidad de avance, la modificación en la intensidad de los picos característicos tiene relación con la concentración molecular de cada muestra que puede estar ligada al paso entre fibras de la película.

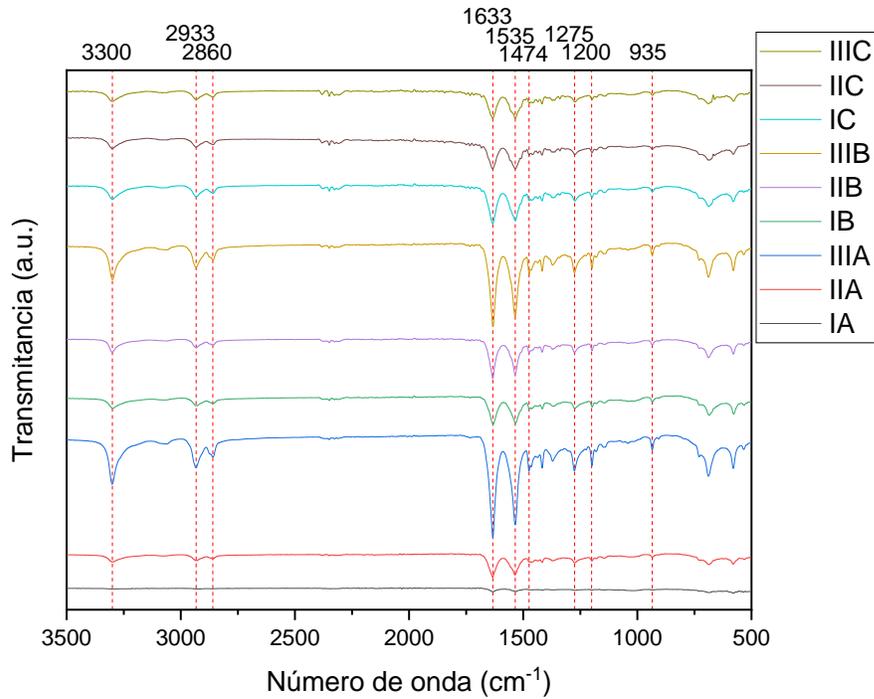


Figura 28: Espectros FTIR y picos principales de las películas electrohiladas de Nylon 6,6.

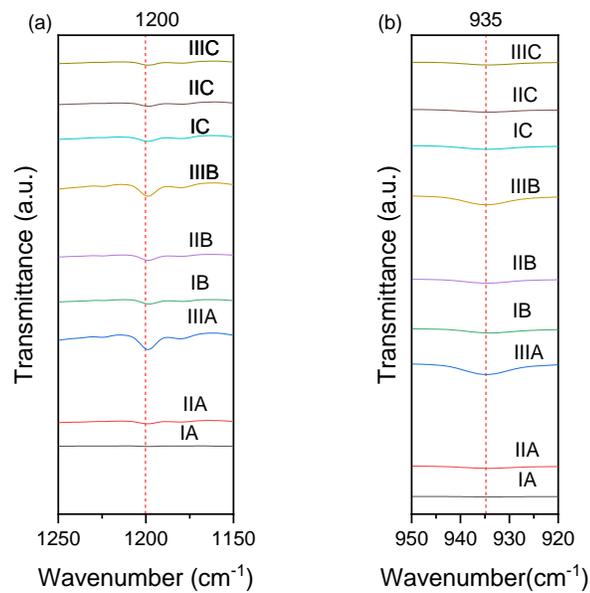


Figura 29: Sección aumentada de espectros IR en la región de 1250 a 1150 cm^{-1} y 950 a 920 cm^{-1} de las muestras electrohiladas.

En la Figura 30 se observan los espectros agrupados conforme a cada nivel analizado de velocidad de avance y tensión eléctrica en la región de 3500 a 1000 cm^{-1} . Revisando los espectros, se puede concluir que la intensidad de los picos 1633 y 1535 cm^{-1} son más sensibles a la velocidad de desplazamiento prestando atención a las gráficas de la Figura 30 (d,e) en donde se consiguen picos más intensos conforme aumenta la velocidad de desplazamiento; de acuerdo a la tensión eléctrica no presenta una tendencia con bandas características del Nylon 6,6.

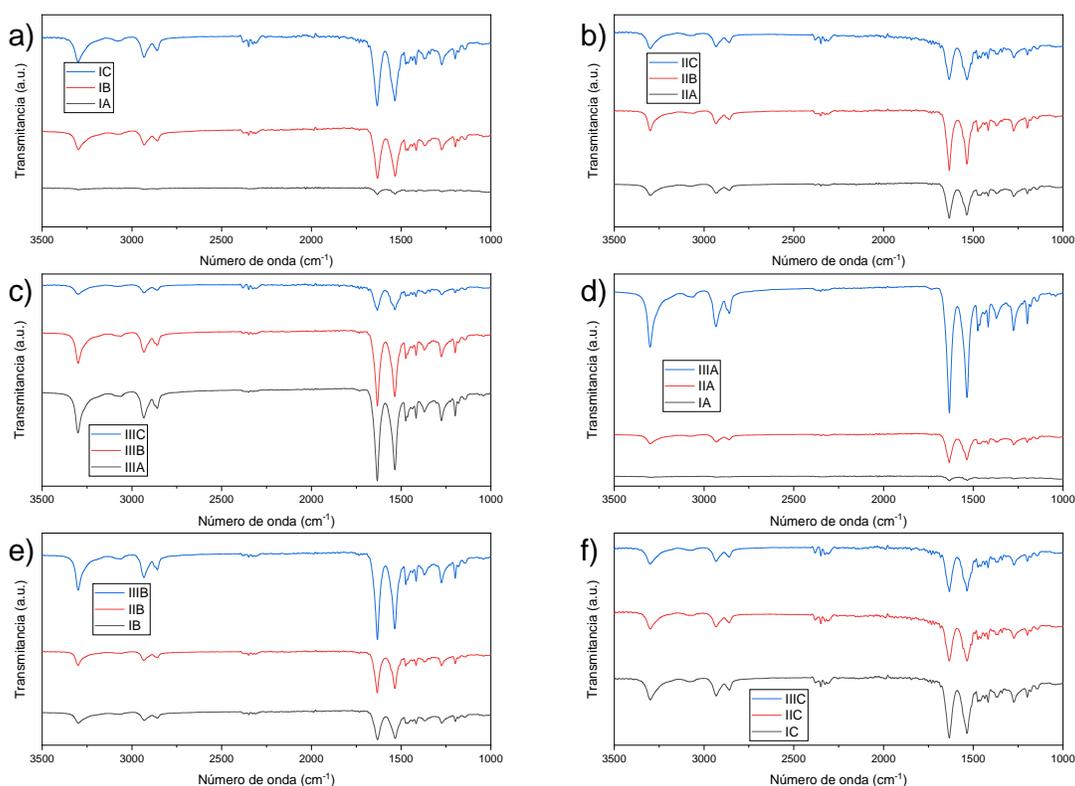


Figura 30: espectros FTIR conforme a tensión eléctrica y velocidad de desplazamiento.

En la Figura 31 se observan los espectro infrarrojos de las películas electrohiladas en la región de 1680 a 1500 cm^{-1} , donde se encuentran las bandas 1633 y 1535 cm^{-1} relacionadas con los puentes de hidrógeno, se observa para las velocidades de 40 y 50 mm/s un ligero aumento en la intensidad conforme se disminuye el voltaje de 1900 a 1500 V. Como se mencionó anteriormente, los espectros IIIA y IIIB presentan picos más intensos de la Figura 31, confirman que estas bandas son más sensibles a la velocidad de desplazamiento, conforme se opera a velocidad de desplazamiento mayores.

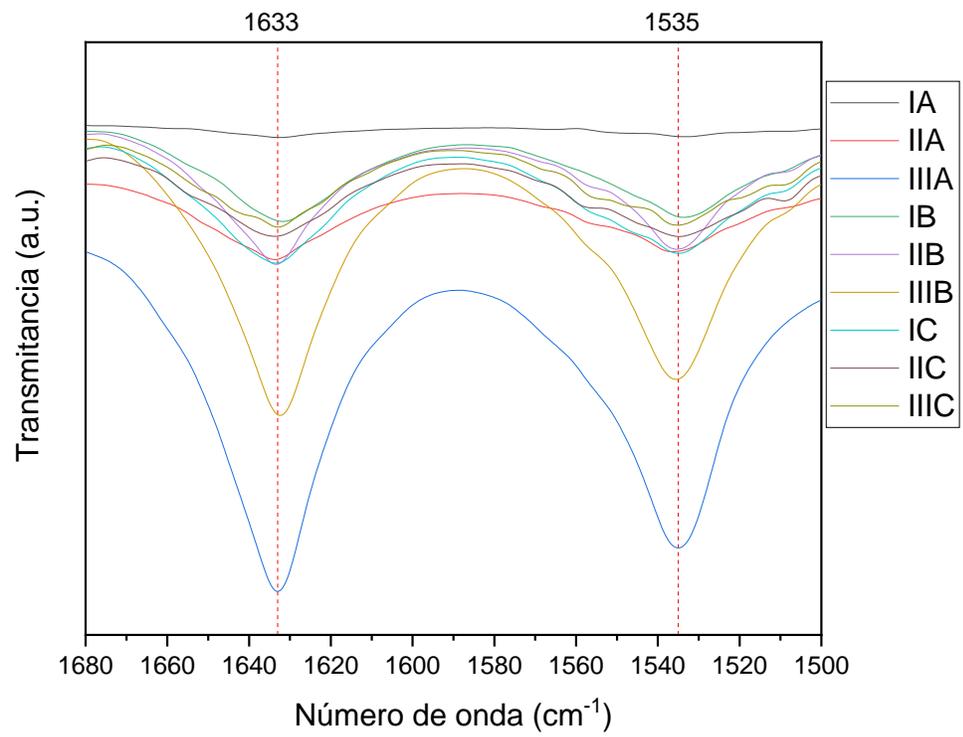


Figura 31: Sección aumentada en la región de 1680 a 1500 cm^{-1} de espectros FTIR de películas electrohiladas de Nylon 6,6.

14. Conclusiones generales

De acuerdo a la configuración experimental propuesta, fue posible electrohilar películas 3D de 5 capas de manera continua y distribuidas uniformemente, las características estructurales del entramado presenta aleatoriedad a pesar de la orientación establecida por las etapas de movimiento del equipo, dicha aleatoriedad se debe a la alta velocidad del jet o chorro con que son atraídas las fibras hacia el sustrato de silicio, la cual resulta mayor a las velocidades de avance a través del camino predefinido por el equipo mediante el software, por lo que no hay tiempo suficiente de que éstas vayan depositándose de manera controlada y alineada. El diseño de la configuración experimental, permite a su vez la generación de películas de gran tamaño, cubriendo un área de 6 por 6 cm², debido a la característica de disposición colineal que se conserva durante las etapas de movimiento que hace posible mantener la intensidad de campo eléctrico a lo largo de toda la trayectoria predefinida por el código G. En la construcción del equipo, el uso de Arduino Uno, motores a pasos NEMA 17 y conjunto de elementos y accesorios para la transmisión de movimiento resultó adecuado para trabajar con velocidades de hasta 60 mm/s durante 30 h en 3 intervalos de tiempo de 10 h con adecuada disipación de calor; el uso de cables blindados fue requerido debido a la alta interferencia electromagnética generada por la fuente de alto voltaje. Con el objeto de realizar un proceso más eficiente, un sistema para el control de humedad y temperatura es requerido para evitar la obstrucción en la punta del hilador debido a la rápida solidificación de la solución de nylon 6,6 debido a una alta humedad y temperaturas relativamente altas; otro factor importante para mejorar la calidad de las películas es la velocidad de flujo, un alto flujo facilita el goteo de solución que termina depositándose en el sustrato o bien en una parte de la película ya electrohilada, por lo que trabajar a velocidades menores a los 0.01 mL/h es una opción para evaluar este evento común en configuraciones verticales debido al efecto de la gravedad.

Así mismo, de acuerdo a las propiedades del ácido fórmico, al contar con una constante dieléctrica relativamente alta, se experimenta con mayor facilidad la generación de múltiples chorros, lo cual contribuye a la presencia de mayor número de fibras depositadas al azar.

De acuerdo al análisis de los gráficos obtenidos en la simulación mediante software COMSOL Multiphysics, conforme a las curvas de nivel, llevar el electrodo afilado lo más cerca posible a la parte inferior del sustrato, permite una intensidad de campo eléctrico mayor, que a su vez incrementa la fuerza eléctrica con que son atraídas las fibras y permite a su vez trabajar con niveles de tensión eléctrica menores. Comparando las simulaciones entre la configuración propuesta con una configuración de colector tipo plato, se observa la convergencia claramente de las líneas de campo eléctrico hacia el colector tipo alfiler.

De acuerdo a las imágenes de SEM, al visualizar una mayor integración de fibras en las magnificaciones de 100X es considerablemente observable la orientación de fibras conforme a las etapas de movimiento, dicha tendencia se desvanece conforme se aumenta la magnificación de las imágenes. Se observa considerablemente una reducción en cuanto al diámetro de fibra y entramado de la película conforme disminuye el voltaje y aumenta la velocidad de avance, sin embargo, no se observó una relación directa entre los factores de estudio con respecto al diámetro de las fibras obtenidas, de la misma manera, revisando los resultados obtenidos por el análisis del diseño factorial 3^2 , el factor de tensión de eléctrica tanto como el de velocidad de avance y la interacción entre de ambos no resulto ser significativo por lo que no impacta en los diámetros de las fibras, esto debido a que los valores de probabilidad no resultaron ser menores al cinco por ciento de alpha.

Por otro lado, en cuando al análisis de los espectros infrarrojos, de las 9 películas analizadas, 6 de estas presentan intensidades similares en cuantos a las bandas características del Nylon 6,6, los espectros restantes presentaron intensidades diferente, en cuanto a las películas IIIA y IIIB las intensidades son significativamente mayores al resto y la muestra IA es la que presenta un espectro con los picos más débiles, todos los experimentos se corrieron a la misma concentración, por lo que diferencias pueden estar asociadas a la concentración molecular de cada muestra que puede estar ligada a la densidad de fibras del entramado y al grosor de la misma.

15. Referencias bibliográficas

- Xu, J., Abecassis, M., Zhang, Z., Guo, P., Huang, J., Ehmman, K., & Cao, J. (2014). Accuracy Improvement of Nano-fiber Deposition by Near-Field Electrospinning. *INTERNATIONAL WORKSHOP ON MICROFACTORIES*, 7, 38-44.
- Abdal-hay, A., Abbasi, N., Gwiazda, M., Hamlet, S., & Ivanovski, S. (2018). Novel polycaprolactone/hydroxyapatite nanocomposite fibrous scaffolds by direct melt-electrospinning writing. *European Polymer Journal*, 105, 257-264. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.05.034>
- Blesson , I., Taylor , R., & Reifsnider , K. (2021). Mechanical and Dielectric Properties of Aligned Electrospun Fibers. *Fibers*, 9, 32. doi:10.3390/fib9010004
- Brown, T., Edin, F., Nicola, N., Skelton, A., Hutmacher, D., & Dalton, P. (2014). Melt electrospinning of poly(ϵ -caprolactone) scaffolds: Phenomenological observations associated with collection and direct writing. *Materials Science and Engineering C*, 45, 698-708. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2014.07.034>
- Camillo, D., Fasano, V., Fabrizio, R., Santucci, S., Lozzi, L., Camposeo, A., & Pisignano, D. (2013). Near-field electrospinning of light-emitting conjugated polymer nanofibers. *Nanoscale*, 5, 11637-11642. doi:10.1039/C3NR03094F
- Chang, R. (2010). *Química* (10 ed.). México: McGraw-Hill.
- Cheng-Tang , P., Chung-Kun, Y., Liwei , L., Yi-Syuan , L., Hui-Wen, L., Jacob Chih, C., & Shiao-Wei , K. (2014). Energy harvesting with piezoelectric poly(g-benzyl-L-glutamate) fibers prepared through cylindrical near-field electrospinning. *RSC Adv*, 4, 21563-21570. doi:10.1039/c4ra01452a
- Choi, W., Kim, G. H., Shin, J. H., Lim, G., & An, T. (2017). Electrospinning onto Insulating Substrates by Controlling Surface Wettability and Humidity. *Nanoscale Research Letters*, 12, 7. doi:10.1186/s11671-017-2380-6
- Coates, J. (2000). *Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach*. (E. o. Chemistry, Ed.) Chichester, England: R.A. Meyers.
- Escrig Murúa, J., & López Cabrera, C. (2012). *Introducción al electromagnetismo*. Santiago, Chile: <http://uvirtual.usach.cl>.
- Faynman, R., & B. Leighton, R. (1998). *Física Volumen II: Electromagnetismo y materia*. México: PEARSON Education.
- Feng Li, H., Da-Wei, L., Jin, H., Yang Yang, L., Fiaz , A., Ya-Li, L., . . . Da-Chuan, Y. (2018). A novel layer-structured scaffold with large pore sizes suitable for 3D cell culture prepared

- by near-field electrospinning. *Materials Science & Engineering C*, 18-27. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.12.016>
- Ghosal, K., Agatemor, C., Tucker, N., Kny, E., & Thomas, S. (2018). Electrical Spinning to Electrospinning: a Brief History. En E. Kny, K. Ghosal, & S. Thomas, *Electrospinning From Basic Research to Commercialization*. Croydon, United Kingdom: The Royal Society of Chemistry.
- Goldstein, J., Lyman, C., Newbury, D., Lifshin, E., Echlin, P., Sawyer, L., . . . Michael, J. (2003). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Gupta, S., Singh, P., & Kumar, R. (2014). Modifications induced by gamma irradiation upon structural, optical and chemical properties of polyamide nylon-6,6 polymer. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 169(8), 679-685. doi:10.1080/10420150.2014.931401
- He, X.-X., Zheng, J., Yu, G.-F., You, M.-H., Yu, M., Ning, X., & Long, Y.-Z. (2017). Near-Field Electrospinning: Progress and Applications. *J. Phys. Chem*, 121, 8663–8678. doi:10.1021/acs.jpcc.6b12783
- Lee, J., Yong Lee, S., Jang, J., Hun Jeong, Y., & Woo Cho, D. (2012). Fabrication of Patterned Nanofibrous Mats Using Direct-Write Electrospinning. *Langmuir*, 7267-7275. doi:/10.1021/la3009249
- Liu, Z., Pan, C., Lin, L., & Lai, H. (2013). Piezoelectric properties of PVDF/MWCNT nanofiber using near-field electrospinning. *Sensors and Actuators A: Physical*, 193, 13-24. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2013.01.007>
- López Rodríguez, V. (2013). *Electromagnetismo I*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia. Obtenido de www.uned/publicaciones
- Mailley, D. (2018). Fabrication of nanofibrous mats by "green" electrospinning for liquid microfiltration applications. *Ph. D. Thesis*. HAL Archives ouvertes.
- Martínez Prieto, N., Ehmann, K., & Cao, J. (2020). Near-field electrospinning on nonconductive substrates using AC fields. *Procedia CIRP*, 93, 120-124. doi:10.1016/j.procir.2020.04.157
- Navarro Pardo, F., Rivera-López, A., Sánchez-Labastida, V., Martínez-Hernández, A., Almendarez-Camarillo, A., & Velasco-Santos, C. (2014). Statistical Study of Process Parameters Effect on Crystallinity of Electrospun Polyamide 6,6 Fibres. doi:10.3390/ecm-1-c007
- Navarro-Pardo, F., Martínez-Barrera, G., Martínez-Hernández, A., M. Castaño, V., Rivera-Armenta, J., Medellín-Rodríguez, F., & Velasco-Santos, C. (2013). Effects on the

Thermo-Mechanical and Crystallinity Properties of Nylon 6,6 Electrospun Fibres Reinforced with One Dimensional (1D) and Two Dimensional (2D) Carbon. *materials*, 6, 3494-3513. doi:10.3390/ma6083494

- Nedjari, S., Hébraud, A., & Schlatter, G. (2015). Organized Assembly of Electrospun Nanofibres: From 1D to 3D. En G. R. Mitchell, & G. R. Mitchell (Ed.), *Electrospinning Principles, Practice and Possibilities*. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, .
- Padmanabhan, T., Kamaraj, V., Magwood Jr., L., & Starly, B. (2011). Experimental investigation on the operating variables of a near-field electrospinning process via response surface methodology. *Journal of Manufacturing Processes*, 13, 104-112. doi:10.1016/j.jmapro.2011.01.003
- Wang, H., Huang, S., Liang, F., Wu, P., Li, M., Lin, S., & Chen, X. (2015). Research on Multinozzle Near-Field Electrospinning Patterned Deposition. *Journal of Nanomaterials*, 2015(529138), 8. Obtenido de <https://doi.org/10.1155/2015/529138>
- Wee Eong, T. (2020). *Electrospin Tech*. (T. Wee-Eong, Editor) Recuperado el 17 de diciembre de 2020, de <http://electrospintech.com/nearfield.html#.X9tttdthKjIU>
- Wee, E. (2021). *Electrospintech*. (E. T. Wee, Editor) Recuperado el 27 de febrero de 2021, de Electrospintech: <http://electrospintech.com/multi-jet.html#.YDrZHWWhKjIV>
- You, X., Ye, C., & Guo, P. (2017). Electric field manipulation for deposition control in near-field electrospinning. *Journal of Manufacturing Processes*, 30, 431-438. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.005>
- Zhang, B., Yan, X., Xu, Y., Zhao, H.-S., Yu, M., & Long, Y.-Z. (2020). Measurement of Adhesion of In Situ Electrospun Nanofibers on Different Substrates by a Direct Pulling Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 8. doi:10.1155/2020/7517109
- Zheng, G., Jiang, J., Wang, X., Li, W., Yu, Z., & Lin, L. (2021). High-aspect-ratio three-dimensional electrospinning via a tip guiding electrode. *Materials and Design*, 198, 109304. doi:10.1016/j.matdes.2020.109304

16. [ANEXO A](#)

Relación y descripción de los dispositivos, accesorios para la construcción del equipo de electrohilado de campo cercano.

Tabla A1: accesorios para la construcción de la carcasa del sistema de electrohilado.

Accesorio	Descripción
<p data-bbox="319 573 737 604">Guía lineal V-SLOT de 20X40 mm</p> 	<p data-bbox="842 573 1422 741">Esta guía lineal es un sistema de estructura modular. Es liviano pero rígido y proporciona una pista ultra suave para un movimiento preciso con las ruedas V Wheel.</p> <p data-bbox="842 758 1162 789">Material: Aluminio 6063-T5</p> <p data-bbox="842 806 1373 837">Dimensiones: 20x40 mm (sección transversal)</p>
<p data-bbox="319 1056 737 1087">Guía lineal V-SLOT de 20X20 mm</p> 	<p data-bbox="842 1056 1422 1308">Esta guía lineal es un sistema de estructura modular. Es liviano pero rígido y proporciona una pista ultra suave para un movimiento preciso con las ruedas V Wheel. En el equipo de E.S. es utilizado para conformar los ejes de desplazamientos en las direcciones x, y y z.</p> <p data-bbox="842 1325 1162 1356">Material: Aluminio 6063-T5</p> <p data-bbox="842 1373 1382 1404">Dimensiones: 20x20 mm (sección transversal):</p>
<p data-bbox="352 1419 704 1451">Tornillo Allen M5 bajo perfil</p> 	<p data-bbox="842 1419 1422 1493">Tornillo estándar para fijación de elementos y accesorios sobre guía lineal V-SLOT.</p> <p data-bbox="842 1509 1263 1541">Largo utilizados (mm): 6, 10, 20, 30</p>
<p data-bbox="274 1766 781 1797">Tornillo Allen M3 6mm cabeza cilíndrica</p>	<p data-bbox="842 1698 1422 1772">Elemento de sujeción con las siguientes características:</p> <ul data-bbox="891 1789 1192 1877" style="list-style-type: none"><li data-bbox="891 1789 1154 1820">• Aleación de acero<li data-bbox="891 1820 1192 1852">• Acabado óxido negro<li data-bbox="891 1852 1065 1883">• Rosca: M3

	<ul style="list-style-type: none"> • Paso: 0.5mm • Diámetro cabeza: 5.5mm • Altura cabeza: 3.0mm • Usa llave Allen de 2.5 mm
<p>Cuña de precisión M5 x 8 mm (OD)</p> 	<p>Utilizada para rellenar pequeños huecos o espacios entre los objetos. Las cuñas se utilizan normalmente con el fin de apoyar, mejorar el ajuste, o proporcionar una superficie plana.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Material: Acero • Grosor: 1 mm ± 0.02 • Tamaño: 8(OD) x 5.00(ID) ± 0.02 mm • Peso: 0.08g $\pm 5\%$
<p>Espaciador de Aluminio M5</p> 	<p>Elemento utilizado para crear un espacio entre el motor a pasos y la placa de montaje (35 mm). Los espaciadores de 3, 6, 9, 13.2 mm son utilizados para espaciar las llantas v-wheel en algunos ejes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Material: Aluminio • Diámetro exterior: 10mm • Diámetro interior: 5.3mm • Acabado: Natural • Largo (mm): 3, 6, 9, 13.2, 35,
<p>Tuerca de seguridad M5 galvanizado</p> 	<p>La tuerca hexagonal de seguridad M5 galvanizado es práctica e ideal cuando se quiere asegurar un tornillo con tuerca en su lugar sin deslizamiento.</p>
<p>Espaciador excéntrica 6 mm M5</p>	<p>Diseñada para crear una precarga a las ruedas V Wheels para las ranuras de la guía lineal V-Slot.</p>



- Agujero excéntrico para tornillo M5
- Los ajustes se realizan con una llave española de 8mm
- El borde está hecho para agujero de 7.12mm
- Ajuste máximo dos veces 0.79 ± 0.01 mm
- Material: acero inoxidable 304
- Peso: 2.15g $\pm 5\%$
- Maquinada CNC

Tuerca Tee martillo V-Slot C-Beam T-Slot-in



Este accesorio es una opción de fijación que se carga desde cualquier punto del perfil. La tuerca se puede colocar después de armar la estructura sin necesidad de tener una entrada libre o abierta al final de la guía lineal.

- Tamaño: 6x10.3x4.4 mm
- Rosca: M5
- Material: Acero carbono
- Acabado: Galvanizado

Rueda Mini V Wheel kit



Kit conformado por: Rueda mini wheel, 2 rodamientos balero MR105ZZ 5X10X4 mm, una cuña de precisión y una tuerca de seguridad M5 galvanizada.

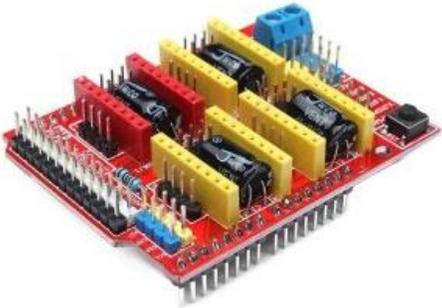
- Diámetro: 15.23mm ± 0.026 mm
- Ancho: 10.00mm ± 0.026 mm
- Material: Delrin (Poliacetal)
- Dureza Rockwell: M80
- Peso: 11.56g $\pm 5\%$

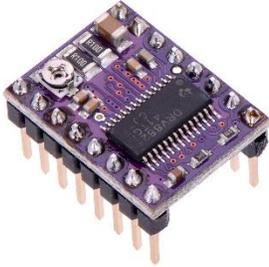
<p>Acoplamiento flexible 5 mm x 8 mm (NEMA 17)</p> 	<p>Elemento de transmisión de movimiento entre el eje del motor y el tornillo ACME. El acoplamiento ofrece cero holgura (backlash) al girar en el sentido o contra-sentido del reloj, es resistente al aceite y la corrosión con un bajo requerimiento de mantenimiento.</p>
<p>Bloque tuerca ACME 8 mm Tr8x2 lead screw</p> 	<p>Diseñada para proyectos que requiere un movimiento lineal con tornillo husillo trapezoidal ACME con un buen balance entre la precisión de paso, rigidez y entrega de torque con avance</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entradas (z): 4 • Precisión de paso (pitch): 2mm • Paso de rosca (p)(lead): 8mm • Tamaño: 40(l)*20(a)*12(al)mm • Material: POM (polyoxymethylene/acetal)
<p>Soporte esquina 90° V-Slot C-Beam CI-Beam T-Slot</p> 	<p>Se utilizan para una ranura de hasta 10 mm de ancho como la guía lineal V-Slot para conectar dos extrusiones de aluminio en ángulo de 90°.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Material: Aluminio fundido • Tamaño: 20 x 20 x 17mm • Acabado: Natural • Para tornillo M5
<p>Tuerca brida dentada M5 acero inoxidable</p>	<p>Elemento práctico e ideal cuando se quiere asegurar un tornillo con tuerca sobre un superficie planas, asegurando que no se enflora por vibraciones gracias a una cara dentada para mejor agarre</p>

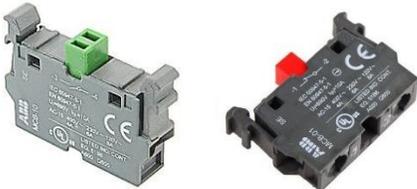
	
<p>Tuerca Tee M5 V-Slot, C-Beam, CI-Beam</p> 	<p>Es una opción de fijación que se carga desde los extremos del perfil.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tamaño: 10x15x3 mm • Rosca: M5 • Material: Acero de bajo carbono
<p>Collar varilla tornillo Acme 8 mm</p> 	<p>El collar varilla tornillo Acme 8mm se coloca en el tornillo trapecoidal Acme o en un mango liso con un tornillo de ajuste. El collar se utiliza para reducir juego, reforzar el sistema lineal con tornillo Acme y detiene la varilla que se mueva de su posición</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diámetro interno: 8.00±0.1 mm
<p>Tornillo Acme 8mm Tr8x2 4 In. 300mm</p> 	<p>Tornillo que combina precisión de paso, rigidez y entrega de torque con avance.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Longitud: 300mm • Norma ISO: 2904 Metric Trapezoidal Threads • Norma DIN: 103 Metric Trapezoidal Threads • Rosca: TR8x2 • Entradas (z): 4 • Precisión de paso (pitch): 2mm • Paso de rosca (p)(lead): 8mm • Material: Acero inoxidable 304, ASME SA213 Grado 304

<p>Rodamiento balero NSK 688 8x16x5mm</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Marca: NSK • Forma de anillo de rodamiento: Bola • Materiales de anillo interior y exterior: Acero para baleros • Material del elemento rodante: Acero para baleros • Estilo de rodamiento: Doble blindado • Diámetro interior d(Ø): 8mm • Diámetro exterior D(Ø): 16mm • Ancho B: 5mm • Dirección de carga: Radial
--	---

Tabla A2: dispositivos eléctricos y electrónicos utilizados en el sistema de electrohilado.

Dispositivo	Descripción
<p>Placa de desarrollo UNO</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Microcontrolador: ATmega328P • Alimentación: 5 - 12 Vcc • Frecuencia de operación: 20 MHz • 6 puertos analógicos de entrada • 13 puertos de entrada/salida digital (incluyendo PWM) • Capacidad de memoria flash: 32 Kb • SRAM: 2 KB • EEPROM: 1 KB • Comunicación a PC por USB
<p>CNC Shield V3.0</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte de 4 ejes (X, Y, Z, A-Puede duplicar X, Y, Z) • Soporta 6 finales de carrera (limit switch), 2 por cada eje. • Utiliza controladores extraíbles paso a paso compatibles con A4988, DRV8825 o similares. • Jumpers para configurar el Micro-Stepping para los controladores paso a paso. • Conector macho para conectores Molex de 4 pines. • Voltaje de alimentación: 12-36 V CC.

<p style="text-align: center;">Controlador de motor a pasos DRV8825</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Este dispositivo cuenta con dos controladores de puente H y un indexador de micropasos diseñado para impulsar un motor a pasos bipolar. • Micropasos PWM: hasta 1/32 micropasos. • Rango de voltaje de operación: 8.2 a 45 V. • Máxima corriente de control: 2.5 A a 24 V, $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$. • Interface simple STEP/DIR. <p>Para más información consultar: www.ti.com</p>
<p style="text-align: center;">Jumpers</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Paso en pines: 2.54 mm. • Corriente admitida: 3 A. • Conector tipo hembra. • Profundidad: 2.44 mm. • Resistencia de contacto: 75 mΩ
<p style="text-align: center;">Motor a pasos NEMA 17</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Tensión de alimentación: 12-24 V. • Corriente de operación por defecto: 800 mA. • Corriente máxima: 1650 mA. • Velocidad máxima: 1000 RPM. • Fases: 2 (bipolar). • Ángulo de paso: $1,8\text{ }^\circ \pm 0,09\text{ }^\circ$. • Resistencia de aislamiento: 100 MΩ (CC 500V) • Posicionamiento par: 15 mN m REF
<p style="text-align: center;">Interruptor de límite (limit switch)</p> 	<p>Un interruptor de límite es un dispositivo electromecánico operado por una fuerza física que le aplica un objeto. Los finales de carrera se utilizan para detectar la presencia o ausencia de un objeto. Estos interruptores se utilizaron originalmente para definir el límite de recorrido de un objeto, en el caso de este proyecto limita el desplazamiento de los carros en las direcciones X-Y-Z.</p>

<p style="text-align: center;">Botón pulsador</p> 	<p>Pulsador modular, momentáneo, empotrado, color rojo y verde, no iluminado, plástico negro y sin bloque de contactos.</p>
<p style="text-align: center;">Soporte universal</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte para máximo 3 bloques de contacto. • Cuenta con un sócalo para el ensamble de un botón pulsador. • Peso: 0.01 kg • Dimensiones: 0.048 X 0.03 m.
<p style="text-align: center;">Bloque de contacto N.A y N.C</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso: 0.013 kg <p>Bloque de contacto por acción mecánica modular, se utiliza con soporte universal y botón pulsador.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bloque normalmente cerrado (N.C.) de color rojo. • Bloque normalmente abierto (N.A.) de color rojo.
<p style="text-align: center;">Botón pulsador de paro de emergencia</p> 	<p>Botón pulsador destinado a operación rápida, con desbloqueo giratorio, no iluminado y hongo de 40 mm de color rojo. Es un elemento modular que se utiliza en conjunto con un soporte universal y un bloque de contacto de acuerdo a la aplicación.</p> <p>Peso: 0.036 kg</p>

Relevador industrial de 8 pines



- Tensión: 120 VAC, 50/60 Hz.
- 10 A/ 250 VAC, 1/3 HP.
- Estándar con LED, pulsador con brazo y Bandera
- IP 40

Enchufe para relevador de 8 pines



- Tensión: 250 V
- Intensidad de corriente en contactos: 10 A.
- Modelo: PF083A
- Estructura interna: conexión de hoja de cobre
- Formulario de contacto: dos abiertos y dos cerrados
- Número de pines: 8 pines redondos
- Método de instalación: tipo de carril

Lámparas piloto



- Tensión: 110-130 VAC
- Intensidad de corriente: 15-17 mA.
- Luz LED piloto compacta.

Relevador de estado sólido SSR40-DA



Características:

- Corriente de carga: 40 A.
- Tensión de operación: 3-32 VDC.
- Corriente de disparo: 7.5 mA/ 12 V.
- Tensión de operación de salida: 90-480 VAC.

Cable multiconductor de 4 vías



Cable multiconductor con malla, mylar e hilo dren, de 4 vías, calibre 22 AWG, color gris. Cuenta con una malla protectora que sirve como blindaje para la protección de la interface de la señal es deseada.

Fuente ATX



Características:

- Entrada AC: 100-127 V/ 8 A.
- DC Output: +5V/ 25 A, +12V/19 A.
- Salida de poder máxima: 300 W.

<p>Gabinete metálico de control</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones: 300x250x150 mm. • Peso: 3.4 kg. • Grado de protección: IP-66 • Cierre con llave tipo palomilla • Cuenta con terminal tipo tornillo para puesta a tierra.
--	---

Tabla A3: relación de materiales para la construcción de la carcasa del sistema de electrohilado.

Construcción de carcasa							
Concepto	Unidad	P. Unitario	Op.	Cantidad	Importe	%	
Rondana 1/4" plana galvanizada	Pza	\$0.26	*	10	\$2.60	0.03%	
Tuerca 5/16" hexagonal	Pza	\$0.52	*	4	\$2.08	0.02%	
Tuerca 1/8" hexagonal	Pza	\$0.66		10	\$6.60	0.07%	
Tornillo 1/4" x 2" gota	Pza	\$1.29	*	4	\$5.16	0.06%	
Tornillo 1/8" x 3/4" c/gota	Pza	\$0.20	*	10	\$2.00	0.02%	
PLA/PHA SHINING SILVER 1.75 / 750gr	Pza	\$890.00	*	1	\$890.00	9.61%	
Hoja de acrílico transparente de 9 mm, se incluye servicio de tercero de mecanizado	Pza	\$600.00	*	1	\$600.00	6.48%	
Cuña precisión M5 8mm(OD)	Pza	\$5.51	*	28	\$154.28	1.67%	
Espaciador aluminio 35mm M5	Pza	\$11.38	*	15	\$170.70	1.84%	
Espaciador aluminio 6mm M5	Pza	\$5.68	*	24	\$136.32	1.47%	
Espaciador aluminio 9mm M5	Pza	\$6.63	*	4	\$26.52	0.29%	
Espaciadora excéntrica 6mm M5	Pza	\$37.81	*	16	\$604.96	6.53%	
Tornillo Allen M3 45mm cabeza cilíndrico	Pza	\$5.51	*	20	\$110.20	1.19%	
Tuerca seguridad galvanizado M5	Pza	\$1.69	*	20	\$33.80	0.36%	

Tuerca Tee martillo V-Slot C-Beam T-Slot drop-in	Pza	\$18.81	*	3	\$56.43	0.61%
V-Slot 20x20 Guía lineal 1000mm	Pza	\$317.25	*	1	\$317.25	3.42%
V-Slot 20x40 Guía lineal 1000mm	Pza	\$424.75	*	2	\$849.50	9.17%
Rueda Mini V Wheel kit	Jgo	\$79.02	*	20	\$1,580.40	17.06%
Acoplamiento flexible 5mm x 8mm (NEMA17)	Pza	\$113.81	*	5	\$569.05	6.14%
Bloque tuerca Acme 8mm Tr8x2 lead screw	Pza	\$142.31	*	5	\$711.55	7.68%
Collar varilla tornillo Acme 8mm	Pza	\$22.61	*	10	\$226.10	2.44%
Tornillo Acme 8mm Tr8x2 4 In. 300mm	Pza	\$208.81	*	5	\$1,044.05	11.27%
Rodamiento balero NSK 688 8x16x5mm	Pza	\$34.39	*	10	\$343.90	3.71%
Espaciador aluminio 13.2mm M5	Pza	\$7.58	*	4	\$30.32	0.33%
Soporte esquina 90° V-Slot C-Beam CI-Beam T-Slot	Pza	\$28.31	*	15	\$424.65	4.58%
Tuerca brida dentada M5 acero inoxidable	Pza	\$5.51	*	8	\$44.08	0.48%
Espaciador aluminio 3mm M5	Pza	\$4.73	*	4	\$18.92	0.20%
Tornillo Allen M5 bajo perfil 10mm	Pza	\$2.83	*	20	\$56.60	0.61%
Tornillo Allen M5 bajo perfil 20mm	Pza	\$3.06	*	30	\$91.80	0.99%
Tornillo Allen M5 bajo perfil 30mm	Pza	\$3.97	*	10	\$39.70	0.43%
Tuerca Tee M5 V-Slot, C-Beam, CI-Beam	Pza	\$5.68	*	20	\$113.60	1.23%
MATERIALES					\$9,263.12	100.00%

Tabla A4: relación de materiales para los circuitos de alimentación, control y fuerza del sistema de electrohilado.

Construcción de eléctrica-electrónica						
Concepto	Unidad	P. Unitario	Op.	Cantidad	Importe	%
Cable GTO 15 de ignición, temperatura de trabajo de -20° C A 60 °C, 15 000 Vac	m	\$160.00	*	5	\$800.00	12%
GABINETE METALICO 300 X 250 mm	Pza	\$717.20	*	1	\$717.20	11%
SOLID STATE RELAY 40A (3-32V DC INPUT) COM-13015	Pza	\$224.14	*	1	\$224.14	3%
Tarjeta CNC SHIELD V3	Pza	\$105.00	*	2	\$210.00	3%
Tarjeta de programación Arduino Uno	Pza	\$250.00	*	1	\$250.00	4%
Tarjeta de programación Arduino Mega	Pza	\$350.00	*	1	\$350.00	5%
Motor a paso con control de lazo cerrado, S42B V1.1, BIGTREETECH	Pza	\$518.08	*	5	\$2,590.40	40%
Botón pulsador color rojo con soporte universal y bloque de contacto N.A. marca ABB	Jgo	\$115.30	*	1	\$115.30	2%
Botón pulsador color verde con soporte universal y bloque de contacto N.A. marca ABB	Jgo	\$115.30	*	1	\$115.30	2%
Botón pulsador paro de emergencia MPET4-10R con soporte universal y bloque de contacto N.A. marca ABB	Pza	\$174.49	*	1	\$174.49	3%
Lampara piloto color rojo, 120-130 V AC, ABB	Pza	\$134.00	*	1	\$134.00	2%
Lampara piloto color verde, 120-130 V AC, ABB	Pza	\$134.00	*	1	\$134.00	2%
Lampara piloto color azul, 120-130 V AC, ABB	Pza	\$134.00	*	1	\$134.00	2%
Cable calibre 18 AWG color negro de Cu,	m	\$3.62	*	10	\$36.20	1%

Relevador industrial de 8 pines, 120 V AC.	Pza	\$116.41		1	\$116.41	2%
Conector glándula 3/4"	Pza	\$24.14	*	1	\$24.14	0%
Cincho plástico sujetador	Jgo	\$19.80	*	1	\$19.80	0%
Base relevador encapsulado de 8 pines	Pza	\$77.59	*	1	\$77.59	1%
Contacto de sobreponer duplex	Pza	\$16.38	*	1	\$16.38	0%
Clavija industrial plástica de 2 polos y tierra	Pza	\$18.90	*	1	\$18.90	0%
Cinta de aislar negra	Pza	\$17.80	*	2	\$35.60	1%
Pasta para soldar	Pza	\$28.00	*	1	\$28.00	0%
Limite de carrera, interruptor		\$21.00	*	6	\$126.00	2%
Thermofit 1/8"	Pza	\$3.00	*	10	\$30.00	0%
MATERIALES					\$6,477.85	100%

17. ANEXO B

Imágenes de porcentaje de área de fibras.

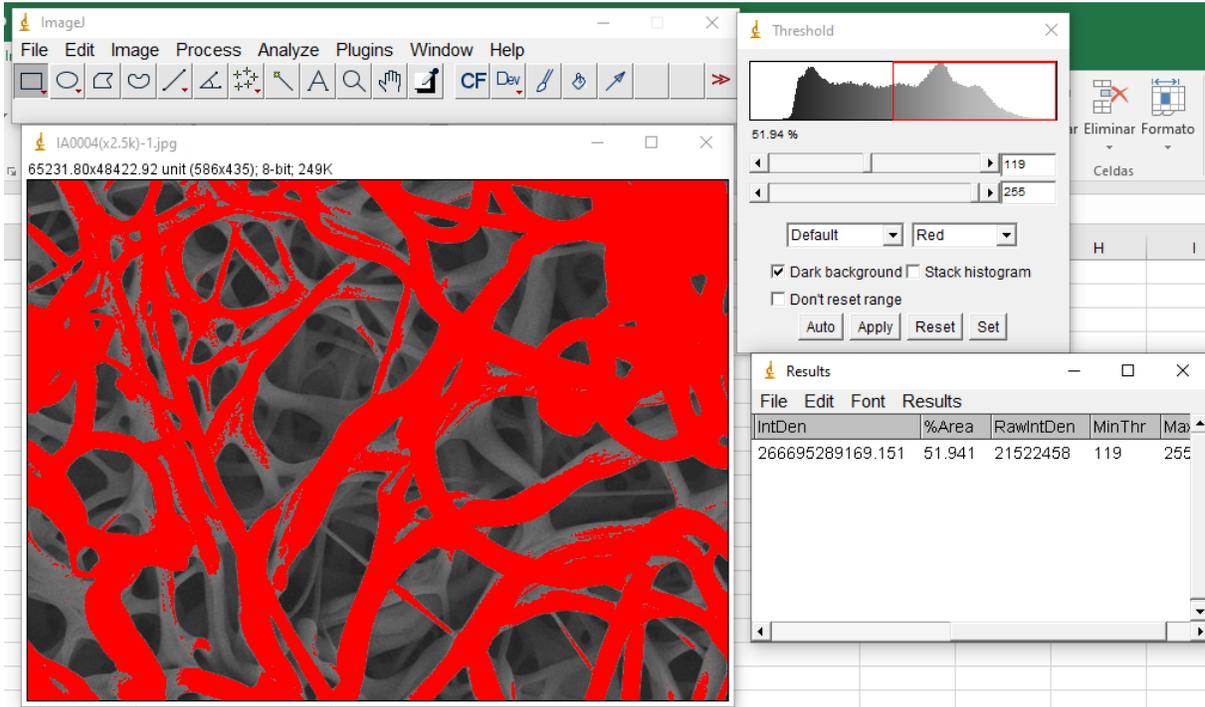


Figura B1: estimación de porcentaje de fibra de película IA.

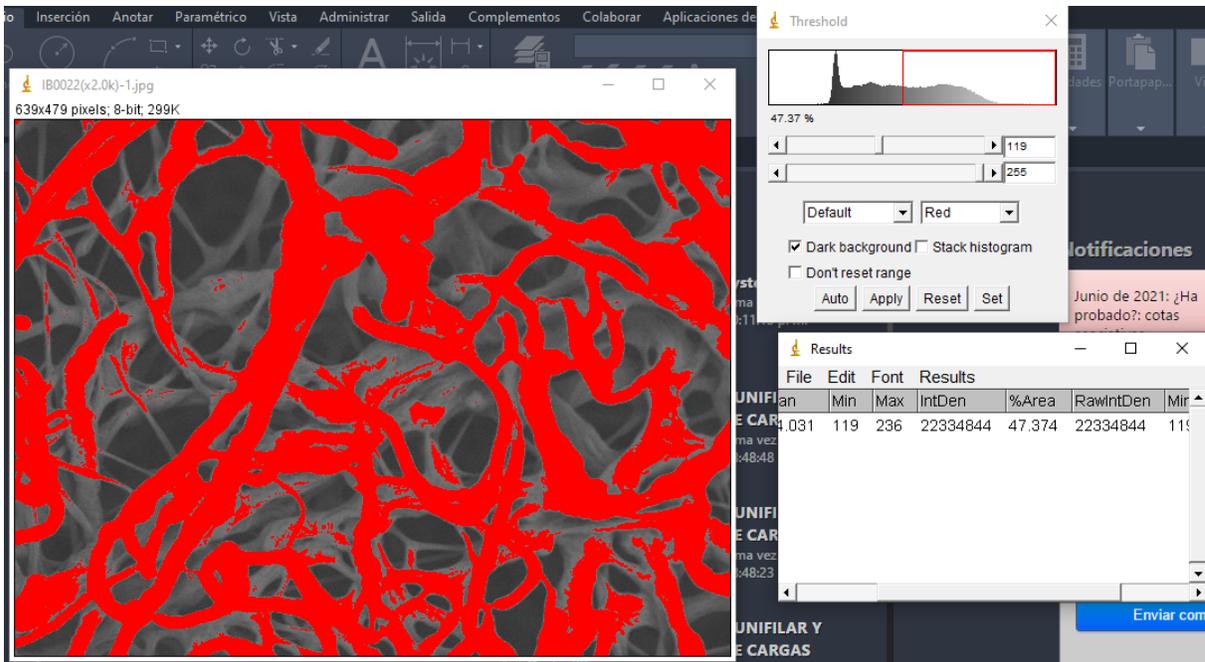


Figura B2: estimación de porcentaje de fibra de película IB.

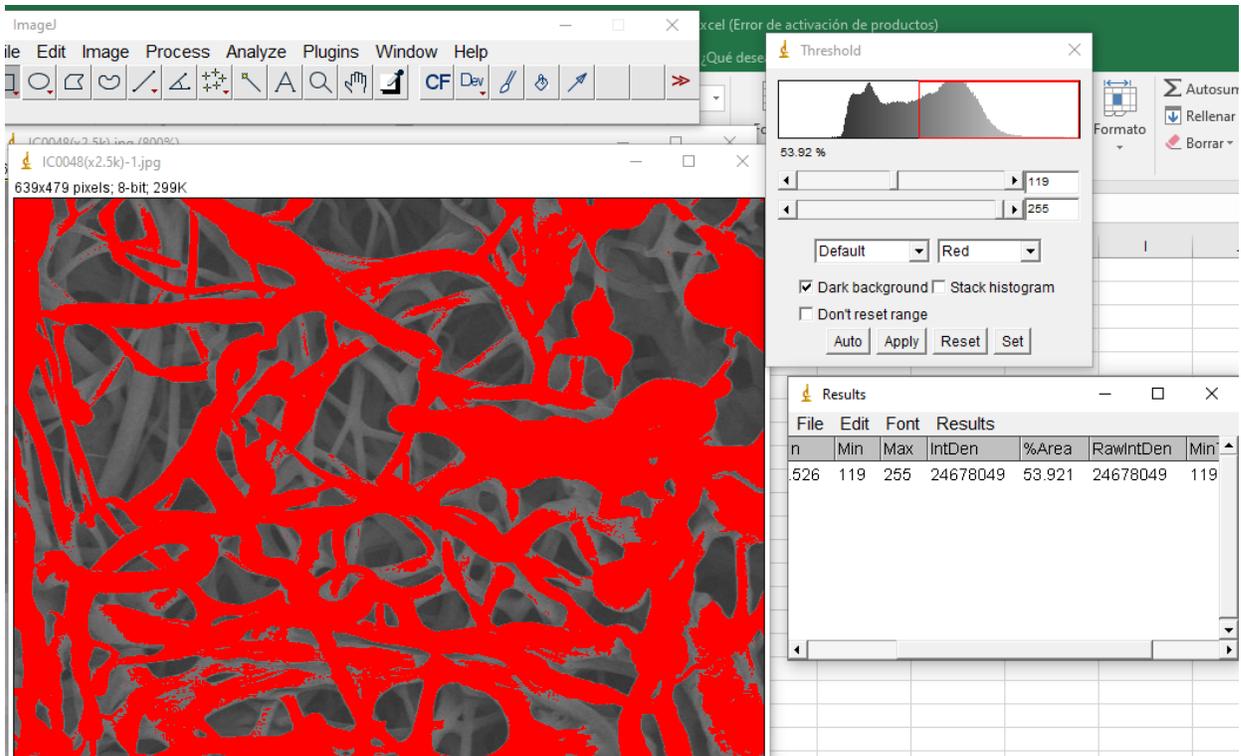


Figura B3: estimación de porcentaje de fibra de película IC.

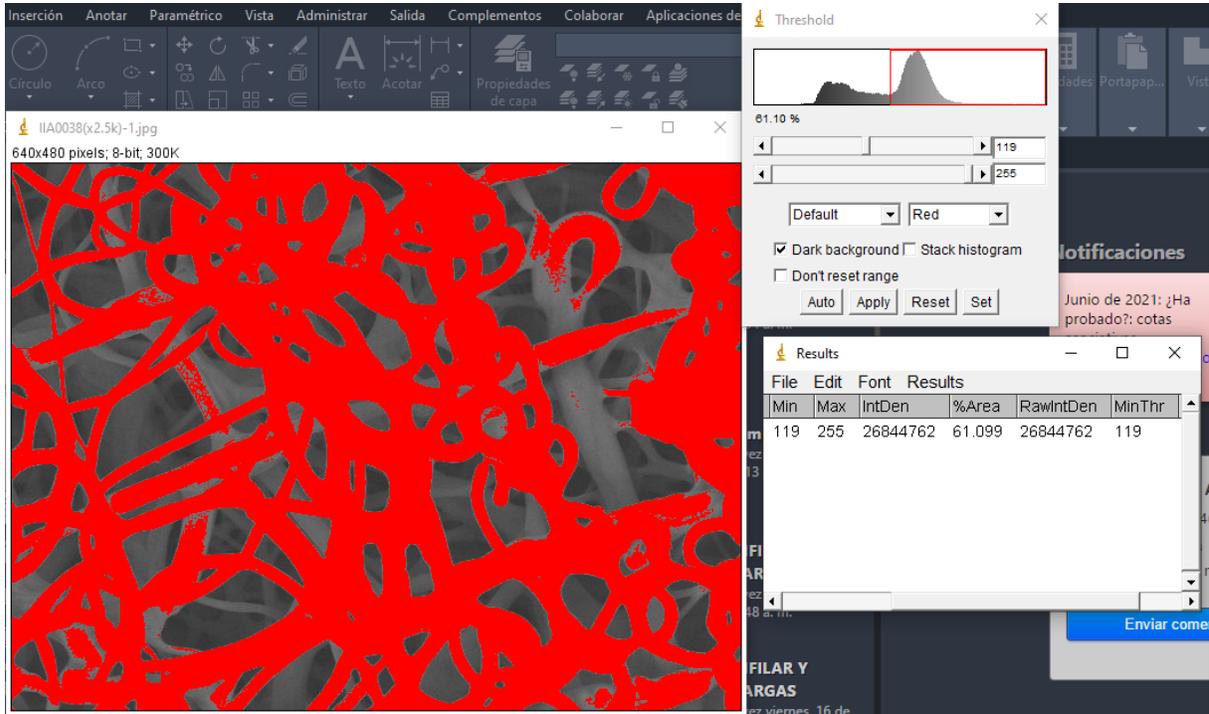


Figura B4: estimación de porcentaje de fibra de película IIA.

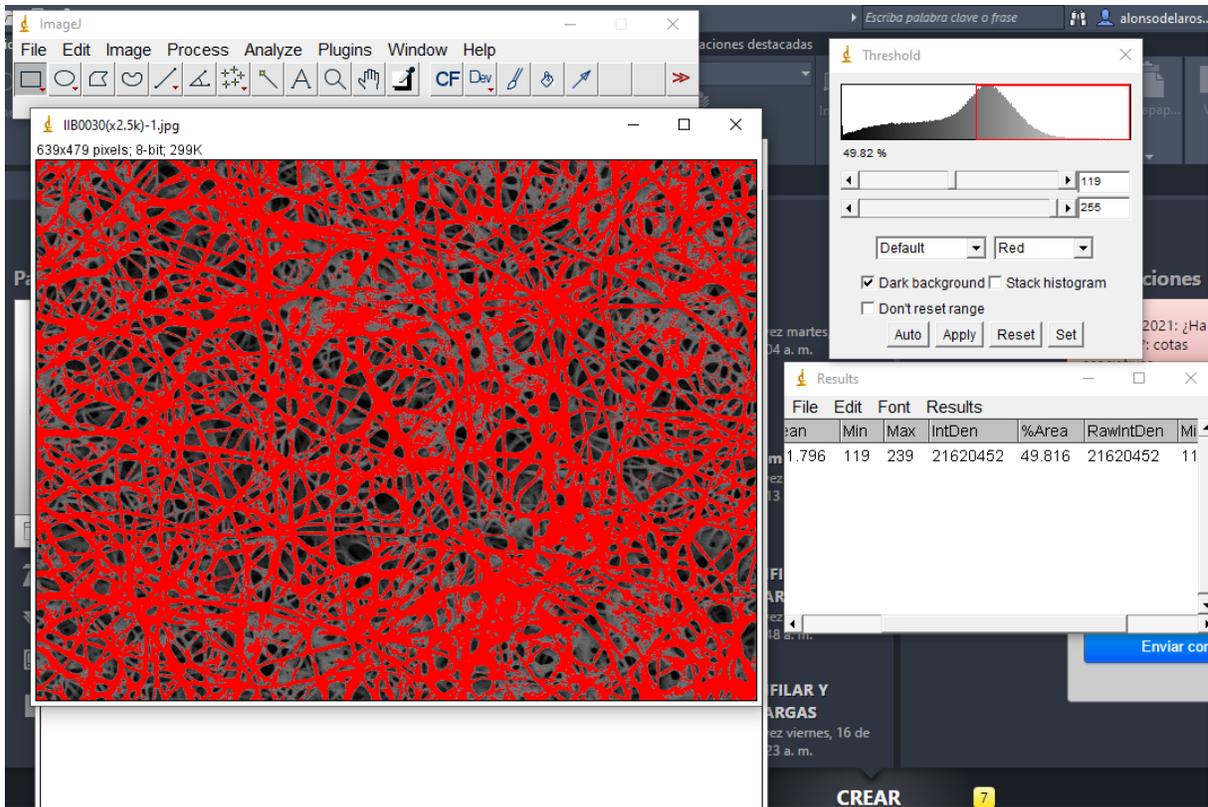


Figura B5: estimación de porcentaje de fibra de película IIB.

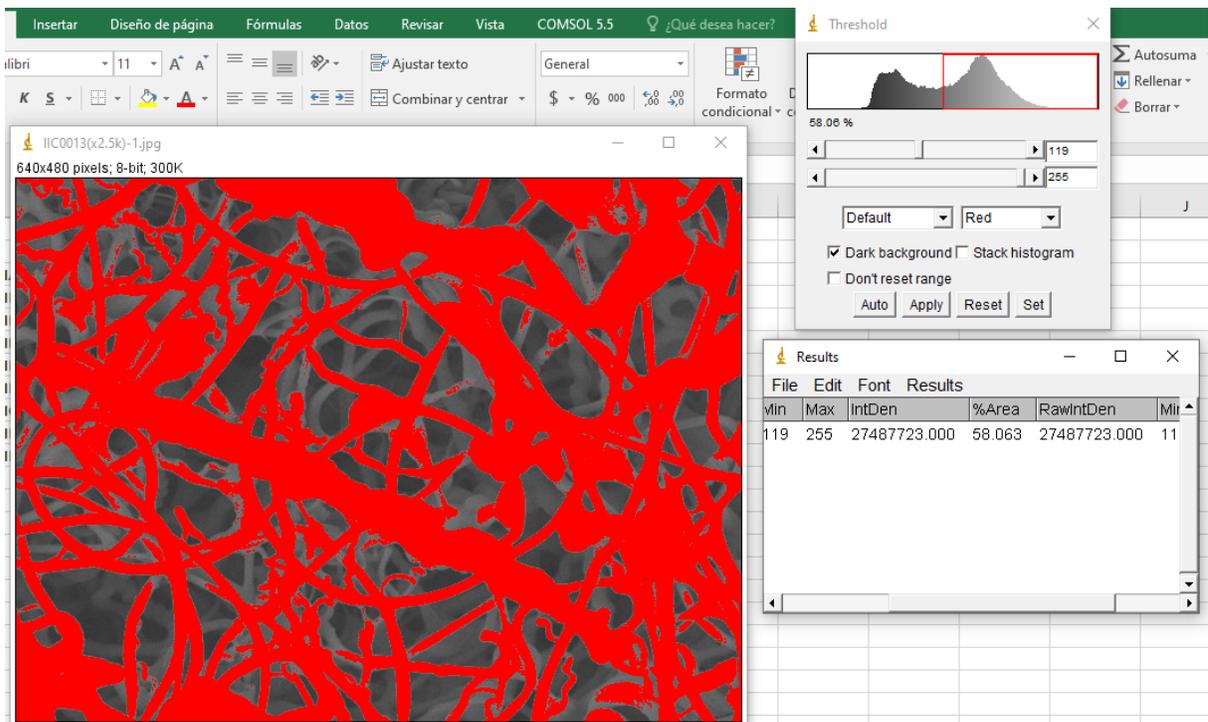


Figura B6: estimación de porcentaje de fibra de película IIC.

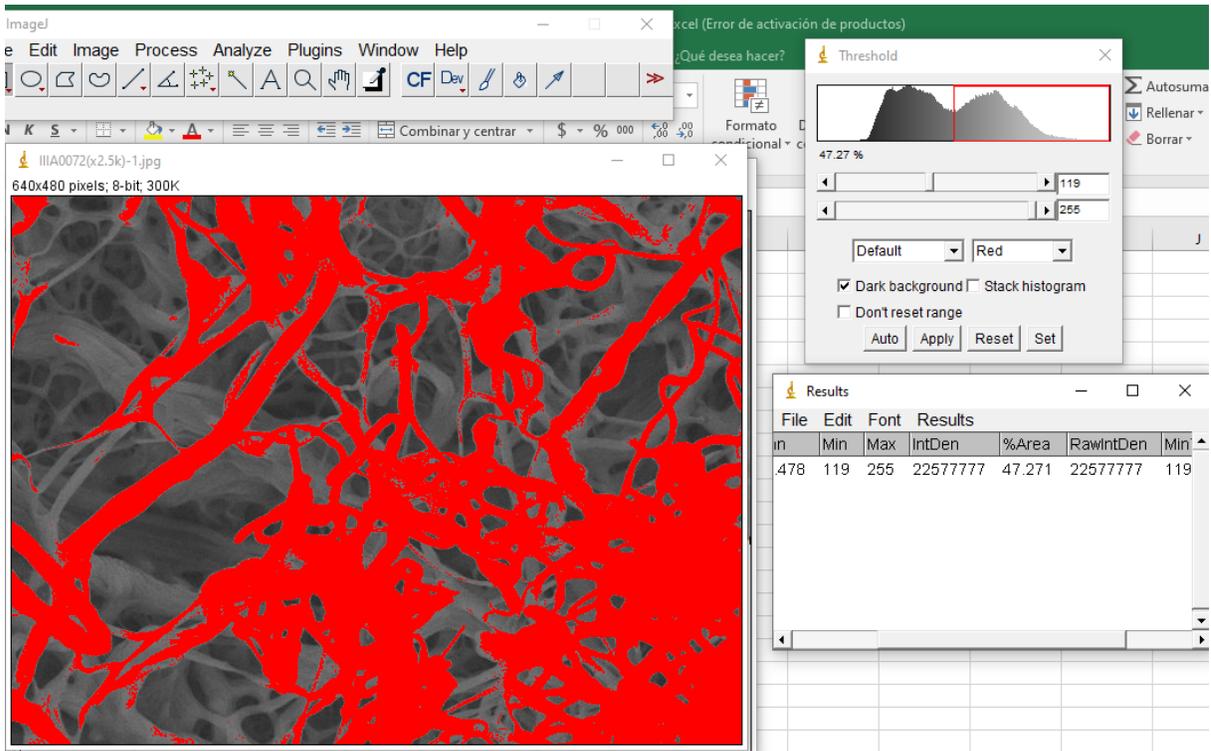


Figura B7: estimación de porcentaje de fibra de película IIIA.

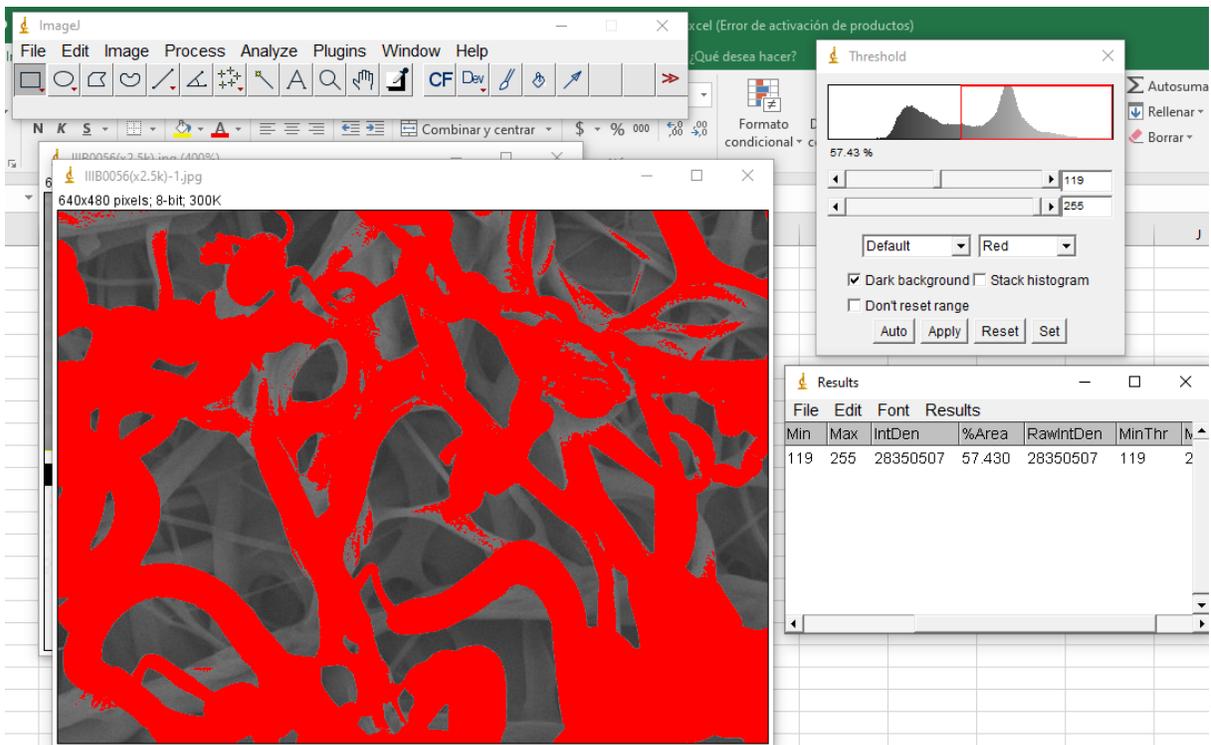


Figura B8: estimación de porcentaje de fibra de película IIIB.

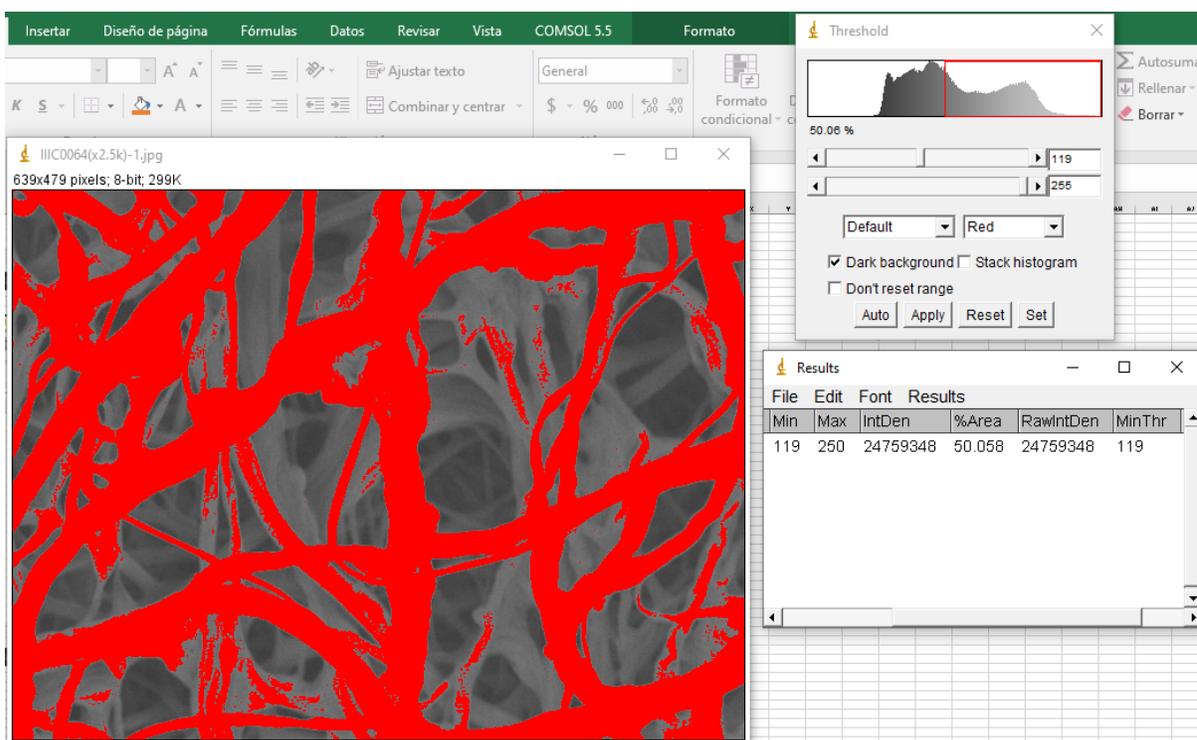


Figura B9: estimación de porcentaje de fibra de película IIIC.

18. [ANEXO C](#)

Productos académicos

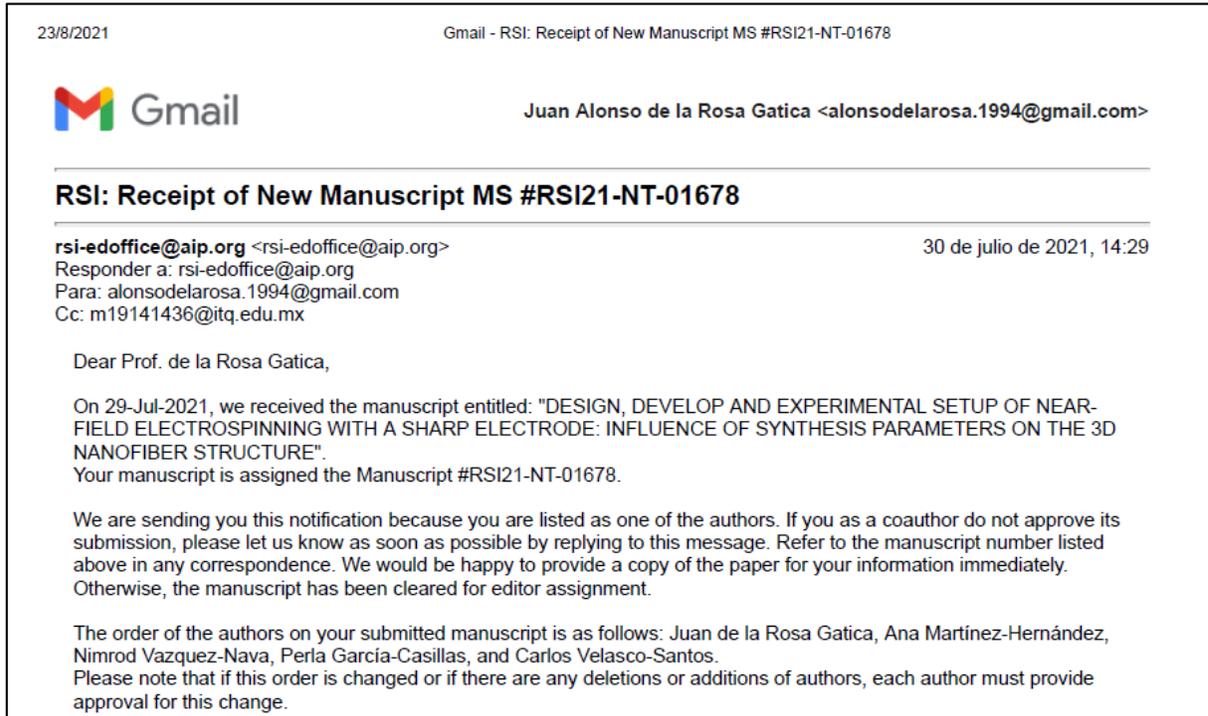


Figura C1: Recepción de nuevo manuscrito en revista Review of Scientific Instruments.

Mexico City, April 27th, 2021

Juan Alonso de la Rosa Gatica
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Instituto Tecnológico de Querétaro

I am pleased to inform you that your contribution "DESIGN, CONSTRUCTION AND SETUP OF NEAR-FIELD ELECTROSPINNING WITH A PIN COLLECTOR: INFLUENCE OF SYNTHESIS PARAMETERS ON THE 3D NANOFIBERS STRUCTURE" by *Juan Alonso de la Rosa Gatica, Ana Laura Martinez Hernandez, Nimrod Vázquez Nava, Carlos Velasco Santos,* has been accepted in symposium A7, *Advanced Structural Materials: Mechanics, Properties and Applications of Emerging Materials* at the XXIX International Materials Research Congress, to be held in Cancun in August 15 - 20, 2021.

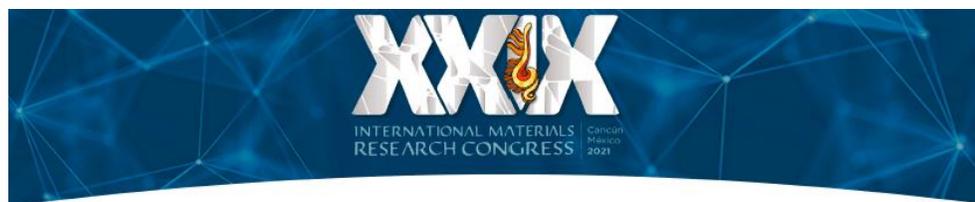
The presentation has been accepted in the Poster modality. Remember that in order to include your abstract in the congress program you must confirm your participation no later than May 21 by choosing the modality you will present your abstract(s); you can do this from your IMRC account.

Organizers of the Symposium

"Advanced Structural Materials: Mechanics, Properties and Applications of Emerging Materials"

Yadienka Martinez Rubi, José María Cabrera Marrero, Francisco C. Robles
Hernandez, Jorge López Cuevas, J. Martin Herrera-Ramírez

Figura C2: carta de aceptación el simposio A7 *Advanced Materials: Mechanics, Properties and Applications of Emerging Materials*.



The Organizing Committee
Acknowledges the Participation of

Juan Alonso de la Rosa Gatica

in the

XXIX International Materials Research Congress

held in Cancun, Mexico
from August 15th to 20th, 2021

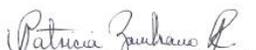

Dra. Patricia Zambrano Robledo
President 2021-2022



Figura C3: reconocimiento por participación en el XXIX International Materials Research Congress.

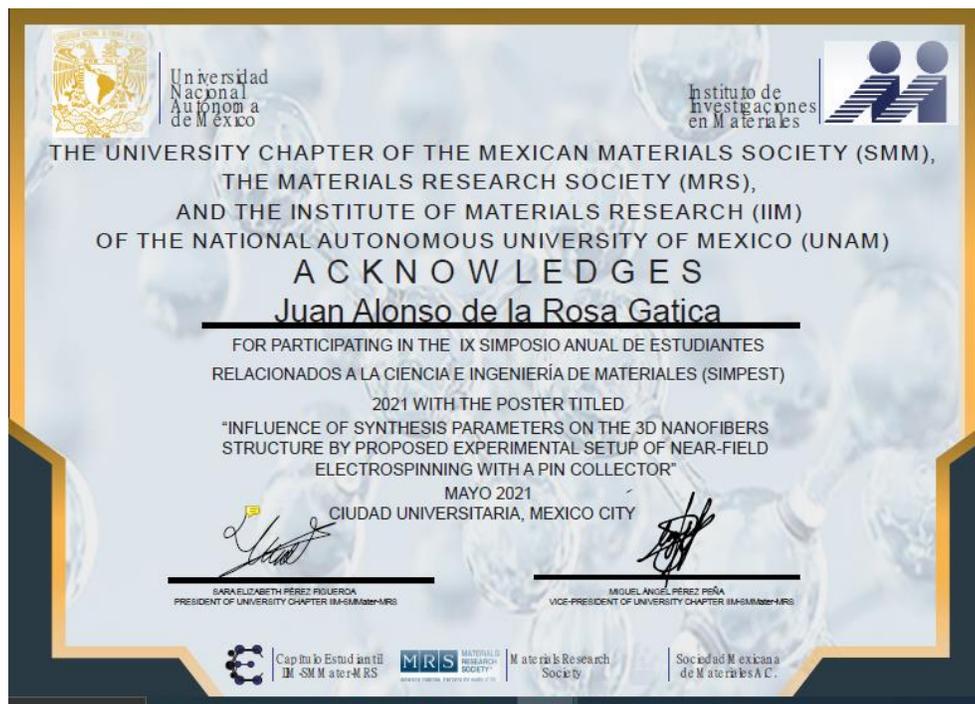


Figura C4: reconocimiento por participación en EL IX SIMPOSIO ANUAL DE ESTUDIANTES RELACIONADOS A LA CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES (SIMPEST).

19. ANEXO D



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO.

Instituto Tecnológico de Querétaro
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Querétaro, Qro. 15/octubre/2021
Oficio No. DEPI/258/2021

A QUIEN CORRESPONDA:

Por medio de la presente se hace constar que el trabajo de tesis con título: **"GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NANOFIBRAS 3D OBTENIDAS POR UN EQUIPO AUTOMATIZADO DE ELECTROHILADO DE CAMPO CERCANO CON COLECTOR TIPO ALFILER"**; ha sido revisado por medio de la herramienta de software TURNITIN, cuyo resultado se anexa a la presente y **no se ha encontrado evidencias de plagio en su realización**. El autor de dicho trabajo, estudiante de **Maestría en Ingeniería, Juan Alonso de la Rosa Gatica**, es el responsable de la autenticidad y originalidad del mismo y; manifiesta que para su desarrollo ha utilizado diversas citas para su soporte, mismas que han sido marcadas a lo largo del mismo y listadas al final como REFERENCIAS bibliográficas.

Se extiende la presente para la continuación del proceso de obtención del grado de Maestría en Ingeniería, y a petición del interesado.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"la tierra será como sean los hombres"

GABRIELA PINEDA CHACÓN
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.c.p. Coordinación de maestría
Archivo

Jany*



Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo, Col. Centro, C.P. 76000,
Querétaro, Qro.
Plantel Centro tel. 01(442) 2274400 ext. 4421
Plantel Norte tel. 01(442) 2435554
e-mail: depin@queretaro.tecnm.mx
tecnm.mx | queretaro.edu.mx



Figura D1: documento de no plagio.



ALONSO DE LA ROSA
Tesis de la Rosa Gatica.docx

Resumen de fuentes

2%
SIMILITUD GENERAL

Rank	Source	Similarity
1	pt.scribd.com INTERNET	<1%
2	datateca.unad.edu.co INTERNET	<1%
3	www.linan-ipicyt.mx INTERNET	<1%
4	www.ensingerplastics.com INTERNET	<1%
5	eprints.uanl.mx INTERNET	<1%
6	www.goodfellow.com INTERNET	<1%
7	Instituto Politecnico Nacional on 2021-01-25 TRABAJOS ENTREGADOS	<1%

Se excluyeron los depósitos de búsqueda:

- Ninguno

Excluido del Informe de Similitud:

- Coincidencias menores (8 palabras o menos)

Se excluyeron las fuentes:

- Ninguno

Figura D 2: reporte de no plagio TURNITIN.