



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“Principios de diseño cinemático
aplicados a la reinterpretación del
colector de fibras de la técnica de
electrohilado”**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero mecatrónico

P R E S E N T A

Ulises Edmundo Espinoza Nava

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016

Método:

Diseño cinemático

Temas:

Ingeniería de tejidos, diseño cinemático.

Términos clave:***Andamio celular***

Microambiente artificial creado para emular funciones de la matriz extracelular natural, se utiliza en la ingeniería de tejidos como medio para el cultivo celular.

Electrohilado

Técnica para la obtención de fibras poliméricas con diámetros en escala micro y nanométrica.

Resumen

La ingeniería de tejidos es un campo multidisciplinario que tiene como finalidad mejorar o reemplazar funciones biológicas, se basa en utilizar células vivas como si se trataran de materiales de ingeniería, para lo cual son importantes los procedimientos de extracción e implantación celular. La implantación se lleva a cabo en microambientes artificiales denominadas **andamios celulares**, los cuales son biomateriales con estructura porosa que debido a su composición permiten la colocación de células y favorecen el desarrollo de los procesos celulares.

El electrohilado es una tecnología basada en una patente del siglo XIX propuesta para separar una sustancia fija de un líquido volátil, consiste en controlar el flujo de una disolución y someterlo a los efectos de un campo eléctrico, el cual provoca la evaporación del líquido volátil y permite que la sustancia fija adquiera forma de hilo súper delgado, el cual se va sobreponiendo en una superficie denominada colector de fibras. Cuando se electrohila una disolución de polímero biocompatible, la estructura porosa obtenida puede utilizarse como andamio celular.

Generalmente las investigaciones relacionadas con el electrohilado se enfocan en el desarrollo y caracterización de nuevos materiales, dejando de lado lo relacionado a la evolución y perfeccionamiento de esta técnica. Sin embargo, el electrohilado presenta complicaciones para controlar las características morfológicas como el diámetro de fibra y el tamaño de poro, las cuales son indispensables para su aplicación como andamios celulares.

En esta investigación se presenta una reinterpretación al colector de fibras de la técnica de electrohilado, la cual permitirá aumentar la precisión del diámetro de fibra obtenido durante el proceso. A partir de principios de diseño cinemático se diseñó un **colector de fibras “cinemático”** el cual implica estados de movimiento deterministas de alta precisión, éste se comparó contra un **colector de fibras “convencional”** que representa la forma típica en la cual se maneja un colector de fibras con movimientos de baja precisión. Mediante un estudio comparativo de las características morfológicas conseguidas con ambos tipos de colectores, se presenta la notable mejora que introduce un colector de fibras “cinemático” el cual permite obtener diámetros de fibra con un coeficiente de variación menor al 10 %.

Dedicatoria

Al enorme esfuerzo que mis padres Edmundo Espinoza y Guadalupe Nava realizaron para apoyar mi formación profesional, por creer en mi capacidad, e impulsar cada uno de mis proyectos. Sin su apoyo no podría haber llegado a estas instancias.

A la gran mujer que tengo como novia, Diana Cruz quien me lleva a formarme nuevas metas. Sin la luz de su mirada no tendría la suficiente inspiración para diseñar nuevas cosas.

A mi familia y amigos por ser pilar fundamental para mi desarrollo profesional.

Ulises Espinoza

Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme ser parte de su plantilla de estudiantes y proporcionarme todos los servicios, apoyos e infraestructura necesarios para mi educación.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería, al Instituto de Investigaciones en Materiales y a la Facultad de Química por las instalaciones, investigadores y personal capacitado que me proporcionaron las condiciones adecuadas para el desarrollo científico y tecnológico del proyecto. Hago mención específica al Dr. Alfredo Maciel Cerda por las atenciones brindadas dentro del laboratorio de nanofibras del Instituto de Investigaciones en Materiales, al Dr. Edwin Gómez Pachón por todas las enseñanzas en la teoría del diseño que cultivó en mí. Y al Dr. Filiberto Rivera Torres por las enseñanzas de la ciencia metrológica que son parte fundamental para este trabajo.

Este trabajo sería imposible sin el trabajo de manufactura que permite materializar las ideas y conceptos de un producto. Expreso mi agradecimiento y profunda admiración a los encargados de esta área tan importante. En este sentido hago mención al taller mecánico del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico a cargo de Norberto Mosqueda Hernández, y el taller de maquinado por control numérico del Instituto de Investigaciones en Materiales a cargo del Ing. Fernando Molina; sin el alto nivel de experiencia, su dedicación y trabajo de calidad no sería posible el desarrollo tecnológico dentro de la universidad.

En cuanto a los laboratorios, expreso mis agradecimientos al laboratorio LUME del Instituto de Investigaciones en Materiales por las facilidades para la obtención de micrografías utilizando el microscopio electrónico de barrido, y la dedicación de sus encargados: Dr. Omar Novelo Peralta, y Fis. Josué Romero Ibarra.

También agradezco al financiamiento del proyecto PAPIIT-UNAM IN-108116, por su participación y compromiso por el desarrollo tecnológico del país.

Finalmente, quiero agradecer al **director de tesis** Dr. Alejandro Ramírez Reivich de la Facultad de Ingeniería, por guiar mi camino profesional, ayudándome en todo momento. Estoy sumamente agradecido por cada lección de ingeniería, diseño y humana; me encuentro orgulloso de haber recibido una formación en diseño de una persona tan brillante. Así mismo agradezco al **Co-director de tesis** Dr. Ricardo Vera Graziano por permitirme ser parte de su grupo de investigación y facilitarme toda la infraestructura de su laboratorio de nanofibras, equipo de electrohilado e insumos sin los cuales este trabajo de investigación hubiera sido imposible.

Ulises Espinoza

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Ubicación del problema de investigación.....	10
1.2 Delimitación.....	12
1.3 Formulación del problema.....	16
1.4 Hipótesis de investigación.....	16
1.5 Justificación.....	17
1.6 Objetivos	18
2 MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 Estado del arte	19
Conexiones cinemáticas de James Clerk Maxwell y Lord Thompson.....	19
Aparato/método para alinear fibra óptica con un dispositivo opto electrónico	20
Método y ensamble para auto alinear un dispositivo opto electrónico.	21
2.2 Bases teóricas.....	21
2.2.1 Ingeniería de tejidos	21
2.2.1 A Tejidos biológicos.....	23
2.2.1 B Andamios celulares.....	24
2.2.1 C Electrohilado	27
2.2.2 Ingeniería de precisión	33
2.2.2 A Elementos de precisión.....	33
2.2.2 B Diseño cinemático.....	34
2.2.2 C Principios de diseño.....	44
2.3 Marco conceptual.....	46
2.3.1 Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM) 3 ^{ra} Edición lengua española.	46
2.3.2 Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida.....	49
3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	52
3.1 Diseño de los colectores de fibras	52
3.1.1 Planteamiento de la necesidad	52
3.1.2 Análisis del problema	52
3.1.3 Definición del problema	54
3.1.4 Diseño conceptual	55

3.1.4A Colector convencional.....	55
3.1.4B Colector cinemático.....	56
3.2 Fabricación de las estructuras por electrohilado.....	62
3.2.1 Obtención de la disolución polimérica.....	62
3.2.2 Proceso de electrohilado.....	62
3.3 Caracterización morfológica.....	67
3.3.1 Medición de área de material depositado.....	67
3.3.2 Medición de circularidad de material depositado.....	69
3.3.3 Medición de diámetro de fibra.....	71
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	73
4.1 Diseño de colectores.....	73
4.2 Estructuras electrohiladas.....	76
4.3 Caracterización morfológica.....	79
4.3.1 Medición de área de material depositado.....	79
4.3.2 Medición de circularidad del cúmulo de material depositado.....	80
4.3.3 Medición de diámetro de fibra.....	85
4.4 Análisis estadístico.....	94
4.4.1 Prueba de hipótesis.....	94
4.4.2 Control de calidad.....	95
4.5 Estudio comparativo.....	98
4.5.1 Comparativa colector “convencional” vs colector “cinemático”.....	98
4.5.2 Comparativa con otros trabajos reportados.....	98
5 CONCLUSIONES.....	101
5.1 Recomendaciones.....	102
5.2 Trabajo futuro.....	102
REFERENCIAS.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Apariencia típica de una membrana electrohilada:	10
Figura 2 Coeficientes de variación del diámetro de fibra reportado con la técnica de electrohilado.	11
Figura 3 Conexiones cinemáticas desmontables clásicas:	20
Figura 4 Sistema mecánico para alinear una fibra óptica y su receptor.	20
Figura 5 Patente de Hall et al. para auto alinear por medio de una conexión mecánica. .	21
Figura 6 Aplicación clínica de la ingeniería de tejidos.	22
Figura 7 Proceso de fabricación por colada de disolvente.	25
Figura 8 Proceso de fabricación por redes de fibras (electrohilado)	26
Figura 9 Proceso de fabricación por separación de fases.	26
Figura 10 Proceso de fabricación sólida de forma libre (impresión 3D)	27
Figura 11 Aparato para obtener fibras de John Francis Cooley.	29
Figura 12 Configuración básica de la técnica de electrohilado	30
Figura 13 Ejemplo de un aparato de electrohilado.	32
Figura 14 Marco de referencia basado en coordenadas rectangulares.	35
Figura 15 Concepto de restricción entre un cuerpo y un marco de referencia.	36
Figura 16 Sobre restricción cinemática de un cuerpo.	37
Figura 17 Elemento de restricción tipo V.	38
Figura 18 Barra delgada como elemento de restricción.	39
Figura 19 Lámina flexible como elemento de restricción.	39
Figura 20 Equivalencia funcional entre barras delgadas y placa flexible.	40
Figura 21 Conexión cinemática desmontable 3,2,1 elementos de restricción.	41
Figura 22 Conexiones desmontables de Lord Kelvin y Maxwell.	41
Figura 23 Representación conceptual de una estructura.	42
Figura 24 Representación de estructura flexible y de rigidez óptima.	43
Figura 25 Estructuras de rigidez óptima en 2 y 3 dimensiones.	44
Figura 26 Elementos involucrados en el parámetro distancia capilar a colector.	53
Figura 27 Detalle del colector convencional	55
Figura 28 Conexión cinemática desmontable para inyector	57
Figura 29 Conexión cinemática desmontable para colector de fibras cinemático.	58
Figura 30 Estructura rígida para montar conexiones cinemáticas de inyector y colector. .	60
Figura 31 Rediseño de la técnica de electrohilado, con conexiones cinemáticas	61
Figura 32 Organización de la muestras obtenidas por la técnica de electrohilado	63
Figura 33 Colector de fibras "convencional"	73
Figura 34 Conexión cinemática desmontable para inyector.	74
Figura 35 Conexión cinemática desmontable para colector de fibras.	75
Figura 36 Membranas electrohiladas con un colector "convencional".	77
Figura 37 Muestras obtenidas con un colector "cinemático"	78
Figura 38 Concepto de medición de circularidad propuesto	80

Figura 39 Circularidad de los cúmulos de fibra obtenidos con un colector "convencional".	81
Figura 40 Circularidad de los cúmulos de fibra obtenidos con un colector "cinemático"...	82
Figura 41 Micrografías de los diámetros de fibra obtenidos con un colector "convencional"	86
Figura 42 Micrografías de los diámetros de fibra obtenidos con un colector "cinemático"	87
Figura 43 Gráfica de los diámetros de fibra obtenidos con un colector "convencional", dentro de las bandas de desviación típica.....	89
Figura 44 Gráfica de los diámetros de fibra obtenidos con un colector "convencional", dentro de las bandas de incertidumbre de medición.	90
Figura 45 Gráfica de los diámetros de fibra obtenidos con un colector "cinemático", dentro de las bandas de desviación típica,.....	90
Figura 46 Gráfica de los diámetros de fibra obtenidos con un colector "cinemático", dentro de las bandas de incertidumbre de medición.	91
Figura 47 Gráfica comparativa de los diámetros de fibra obtenidos con los colectores "convencional", y "cinemático"......	92
Figura 48 Gráfica comparativa de las incertidumbres de medición en el diámetro de fibra, obtenidas con los colectores "convencional", y "cinemático"......	93
Figura 49 Gráfica de control de calidad del diámetro de fibra obtenido con un colector "convencional".	97
Figura 50 Gráfica de control de calidad del diámetro de fibra obtenido con un colector "cinemático".	97
Figura 51 Comparativa de las funciones de distribución de probabilidad de los diámetros de fibra obtenidos con los colectores "convencional" y "cinemático"......	98
Figura 52 Comparativa de los coeficientes de variación del diámetro de fibra.	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Variables utilizadas para la construcción de hipótesis	16
Tabla 2 Repercusión de los grados de libertad en la precisión del parámetro distancia capilar a colector.....	54
Tabla 3 Materiales y procesos de manufactura para colector convencional	56
Tabla 4 Materiales y procesos de manufactura para la conexión cinemática desmontable del elemento emisor	57
Tabla 5 Materiales y procesos de manufactura para la conexión cinemática desmontable del elemento receptor.....	59
Tabla 6 Materiales y procesos de manufactura para la estructura que soporta las conexiones cinemáticas desmontables	61
Tabla 7 Parámetros experimentales para la técnica de electrohilado	64
Tabla 8 Procedimiento para obtener muestras con el colector “convencional”	65
Tabla 9 Procedimiento para obtener muestras con un colector “cinemático”	66
Tabla 10 Resultados de medición de área de material depositado	79
Tabla 11 Valores estimados para el área de material depositado.....	80
Tabla 12 Resultados de medición de área ACi	83
Tabla 13 Resultados de circularidad Ci	83
Tabla 14 Valores estimados de circularidad.....	84
Tabla 15 Resultados de medición	88
Tabla 16 Valores estimados de los diámetros de fibra.....	88
Tabla 18 Límites de control gráfica X	96
Tabla 19 Comparación de coeficientes de variación	99

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Ubicación del problema de investigación

El electrohilado es una tecnología basada en una patente del siglo XIX propuesta para separar una sustancia fija de un líquido volátil, consiste en controlar el flujo de una disolución y someterlo a los efectos de un campo eléctrico, el cual provoca la evaporación del líquido volátil y permite que la sustancia fija adquiera forma de hilo súper delgado, el cual se va sobreponiendo en una superficie denominada colector de fibras. Cuando se electrohila una disolución de polímero biocompatible y biodegradable, la estructura porosa obtenida puede utilizarse como andamio celular. En la figura 1 se muestra la apariencia típica de una membrana fabricada por la técnica de electrohilado.

Dentro de la ingeniería de tejidos, el electrohilado se reconoce como un proceso de manufactura muy utilizado para la fabricación de andamios celulares formados por redes de micro y nanofibras poliméricas. La facilidad de implementación y el amplio catálogo de materiales que pueden utilizarse han permitido introducir al electrohilado dentro de una gran cantidad de laboratorios de investigación. Sin embargo, la técnica cuenta con desventajas, entre las que se encuentran: los altos **tiempos de fabricación**, la **baja precisión morfológica**, y las dificultades técnicas asociadas a la obtención de andamios **tridimensionales**¹.

La experiencia práctica dentro del laboratorio de nanofibras del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM indica que el tiempo de fabricación de un andamio es relativamente elevado. Por ejemplo, un andamio con forma plana con área aproximada a 100 cm² y espesor cercano a 1 mm podría tardar hasta 8 horas.

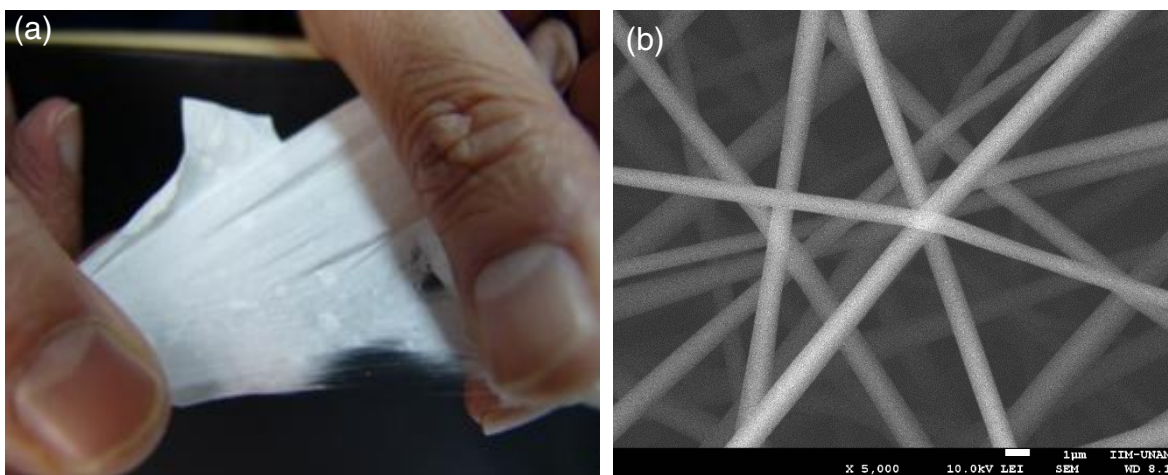


Figura 1 Apariencia típica de una membrana electrohilada:
(a) nivel macroscópico, (b) nivel microscópico.

¹ Geometrías con espesores considerables en relación a sus dimensiones. Para este caso una estructura con espesor mayor a 5 mm

Adicionalmente, se sabe que mediante la técnica de electrohilado se obtiene una baja precisión en los diámetros de las fibras generadas. Prueba de ello es la figura 2, donde se muestra una gráfica de barras que resume los coeficientes de variación² de un conjunto de cuatro trabajos de investigación independientes, realizados dentro del mismo laboratorio de investigación, utilizando el mismo aparato de electrohilado y una misma disolución a base de poli(ácido láctico) disuelto en trifluoroetanol (Muñoz Ramírez, 2014), (Navarro Cerón, 214), (Gómez Pachón , 2013), (Ospina Orejarena, 2011).

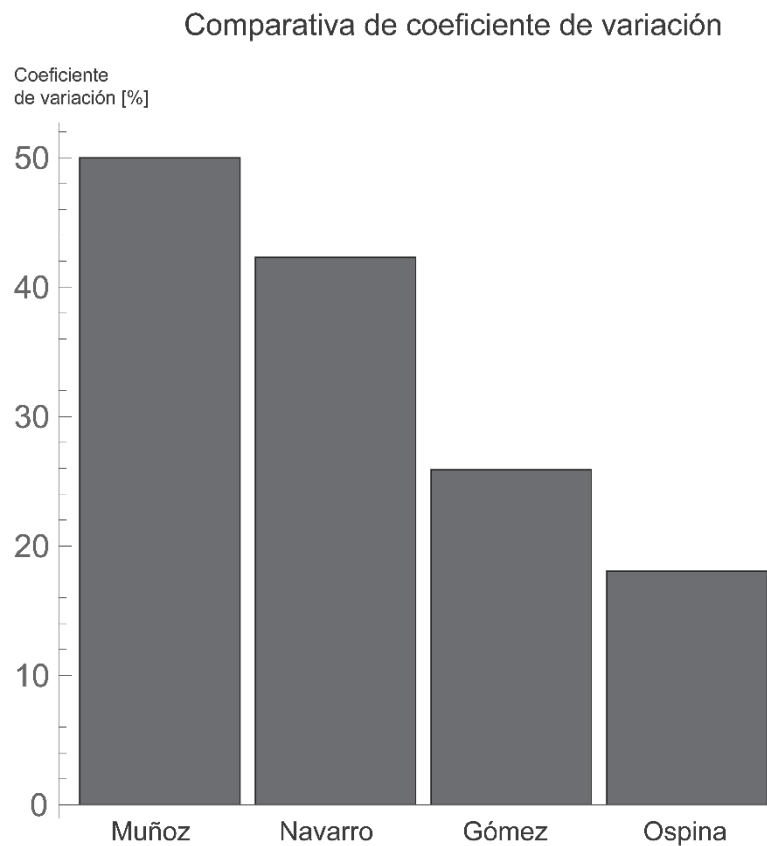


Figura 2 Coeficientes de variación del diámetro de fibra reportado con la técnica de electrohilado.

NOTA

Esta gráfica se construyó a partir de la recopilación de resultados obtenidos en el laboratorio de nanofibras del Instituto de Investigaciones en Materiales IIM, para el electrohilado de disoluciones de Poli(ácido láctico) disuelto en trifluoroetanol.

² El coeficiente de variación es una medida de dispersión de datos, cuantifica que tan grande es la desviación típica σ , respecto a la media \bar{x} . Se calcula como $100 \frac{\sigma}{\bar{x}}$.

En cuanto a la obtención de estructuras tridimensionales con espesores de más de 5 mm, el electrohilado presenta limitantes, debido a que la técnica convencional solo permite obtener estructuras de geometría plana con espesores menores a 1 mm, por lo que la formación de estructuras tridimensionales implica cambios e innovaciones en la técnica.

En cuanto a los altos tiempos de fabricación, hay investigaciones en las cuales se propone multiplicar la cantidad de procesos de electrohilado que trabajan al mismo en la fabricación de una o varias estructuras (Wang, Wang, & Lin, 2012) (kim, Cho, & Kim, 2006) (Varesano, Rombaldoni, Mazzuchetti, Tonin, & Comotto, 2010), este tipo de soluciones denominadas de múltiples chorros se basan en la mayoría de los parámetros experimentales de la técnica convencional, disminuyendo la cantidad de tiempo en la cual se generan las estructuras. En cuanto a la formación de andamios con estructuras tridimensionales se han explorado diversas soluciones, una de ellas es la modificación del campo eléctrico para obtener una estructura con dimensiones de hasta 5 cm por lado, la cual mimetiza de mejor manera la matriz extracelular nativa (Cai, Xu, Jiang, & Yang, 2013), otros métodos incluyen la obtención de estructuras a través de un proceso multi capas, o la unión de estructuras convencionales (2D) a partir de modificaciones al colector de fibras, o en un post procesamiento de las estructuras (Sun, y otros, 2014), sin embargo el asunto de la precisión del diámetro de fibra obtenido con esta técnica sigue manteniéndose como uno de los retos principales³, el cual representa una gran oportunidad de investigación en la cual puede incursionar la ingeniería de diseño.

De tal manera que el problema de investigación de este trabajo, se centra en la fabricación de andamios celulares por la técnica de electrohilado, y en particular en explorar nuevas maneras de **augmentar la precisión del diámetro de fibra para esta técnica.**

*En el campo de los andamios celulares electrohilados, el tema de la **precisión asociada al diámetro de fibra** se mantiene como unos de los retos a vencer para escalar la técnica de electrohilado a niveles industriales. La **ingeniería de diseño** puede abordar el problema a través de sus métodos de investigación.*

1.2 Delimitación

El electrohilado puede entenderse como un proceso de manufactura que transforma materia prima en un producto final con características particulares que le permiten servir para un propósito específico. Para este proceso la materia prima es una disolución polimérica que se procesa para convertirse en una membrana conformada por fibras

³ Esta tendencia se observa en el número de publicaciones de las bases de datos de artículos científicos. Sin embargo, este trabajo se concentra en los resultados evaluados en desarrollos previos del laboratorio de nanofibras del IIM UNAM.

sobrepuestas, y que para los alcances de este trabajo se aborda su potencial aplicación como andamio celular utilizado en ingeniería de tejidos.

El uso de la técnica de electrohilado como proceso de manufactura de andamios celulares⁴, hace requerir un adecuado control sobre las características morfológicas obtenidas, en general el diámetro de fibra y la porosidad de la red de este tipo de estructuras se vuelven importantes ya que generan el espacio sobre el cual se depositarán las células. Sin embargo, la técnica de electrohilado presenta limitaciones en cuanto al control de estas características.

Así que el esfuerzo por mejorar la precisión del diámetro de fibra de las estructuras, comienza por la identificación de los parámetros de los cuales depende el proceso de electrohilado, en ese sentido, una investigación bastante útil es la desarrollada por Theron et al (2004). donde se presenta un estudio experimental sobre los **parámetros gobernantes del electrohilado**, identificados como: diferencia de potencial, flujo volumétrico de disolución, concentración de polímero en la disolución, peso molecular del polímero y distancia capilar a colector. A partir de estos cinco parámetros Theron et al propone caracterizar el desempeño de cada disolución polimérica por medio de un modelo matemático para la densidad volumétrica de carga asociada al jet de electrohilado, en el cual cada parámetro gobernante contribuye a la densidad volumétrica por medio de una ley de potencia.

El modelo de densidad volumétrica de carga asociado al chorro (jet) de electrohilado depende de cinco parámetros: diferencia de potencial, flujo volumétrico de disolución, concentración de polímero en la disolución, peso molecular del polímero y distancia capilar a colector

Los resultados de la investigación conducida por Theron permiten reducir y cuantificar el conjunto de parámetros que repercuten en el proceso de electrohilado en general. Sin embargo, no aportan información suficiente respecto a la repercusión de los parámetros en el diámetro de fibra de las membranas electrohiladas. Thompson et al (2007) presenta un estudio sobre el efecto de un conjunto de parámetros de electrohilado sobre el diámetro de fibra obtenido. Dicha investigación consiste en evaluar el diámetro de fibra en función de cada uno de los parámetros propuestos, para posteriormente realizar un análisis de regresión y cuantificar el efecto de cada parámetro según la pendiente del modelo que presenta.

⁴ Es importante aclarar esta aplicación, ya que para otras aplicaciones podría presentarse el caso de que la precisión morfológica no sea tan importante o incluso no sea benéfica.

Los resultados generados llevan al autor a clasificar los parámetros de electrohilado en tres categorías diferentes: parámetros con un fuerte efecto, parámetros con moderado efecto y parámetros con un efecto menor.

*Los parámetros con un fuerte efecto en el **diámetro de fibra** son: radio inicial del jet, distancia de capilar a colector, densidad volumétrica de carga del jet, y viscosidad de la disolución.*

Con base en las investigaciones de Theron y Thompson es posible discernir cuales parámetros son los adecuados para dilucidar una estrategia que permita mejorar la precisión morfológica de las estructuras fabricadas por electrohilado. A partir de ambas investigaciones es posible agrupar los parámetros en tres categorías diferentes: los parámetros de la disolución polimérica, los parámetros del equipo y un conjunto adicional de parámetros que son dependientes de los anteriores.

Los parámetros de la disolución polimérica: concentración, peso molecular y viscosidad de la disolución, son de naturaleza química y dependen de los insumos, reactivos y su preparación.

Los parámetros del equipo: diferencia de potencial, flujo volumétrico de disolución y distancia capilar a colector, dependen de una fuente de voltaje, un inyector de disolución y un colector de fibras respectivamente, los cuales excluyendo al colector son equipos comerciales de laboratorio.

Los parámetros dependientes: diámetro inicial del jet de electrohilado y densidad volumétrica del jet, son parámetros que dependen de los parámetros anteriores y técnicamente, no pueden modificarse directamente por el usuario.

Los resultados de las investigaciones anteriores hacen **limitar la investigación** aquí propuesta, a una estrategia capaz de aumentar la precisión del diámetro de fibra de membranas electrohiladas, basada en el parámetro distancia capilar a colector, y por ende al rediseño de un colector de fibras. Las ventajas son las siguientes:

1. La distancia capilar a colector es el único parámetro que tiene un fuerte efecto en el diámetro de fibra, y que además puede modificarse de manera directa y rápida.

2. No existe un colector de fibras comercial ampliamente utilizado a niveles de laboratorio. A diferencia de la fuente de voltaje e inyector de disolución, los cuales son equipo de laboratorio convencional.
3. Los parámetros de la disolución, son de naturaleza química los cuales están fuera del campo de estudio de este trabajo.

1.3 Formulación del problema

Dado que el parámetro distancia capilar a colector de la técnica de electrohilado muestra tener relación con el diámetro de las fibras obtenidas. Se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Será posible que un aumento en la precisión del parámetro distancia capilar a colector, conlleve un incremento en la precisión del diámetro de fibra de membranas electrohiladas?

1.4 Hipótesis de investigación

El sistema de hipótesis se muestra en las ecuaciones 1 y 2, el cual se basa en relacionar la varianza del diámetro de fibra obtenido con los colectores “convencional” y “cinemático”⁵, de acuerdo a las variables que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Variables utilizadas para la construcción de hipótesis

Variable	Significado
D_{Con}	Variable aleatoria que representa el diámetro de fibra de una membrana electrohilada, obtenida con un colector de fibras “convencional”.
D_{Cin}	Variable aleatoria que representa el diámetro de fibra de una membrana electrohilada, obtenida con un colector de fibras “cinemático”.
$\sigma^2(D_{Con})$	Varianza de los diámetros de fibra obtenidos con un colector “convencional”.
$\sigma^2(D_{Cin})$	Varianza de los diámetros de fibra obtenidos con un colector “cinemático”.

⁵ El colector “cinemático”, es un colector de fibras que permite una alta precisión en el parámetro distancia capilar a colector.

El colector “convencional”, es un colector de fibras cuya precisión depende de mediciones manuales efectuadas por el usuario.

Hipótesis nula

La precisión de los diámetros de fibra obtenidos con un colector “convencional”, es igual a la precisión de los diámetros de fibra obtenidos con un colector “cinemático”, lo cual se expresa en la Ecuación 1.

$$\frac{\sigma^2(D_{Con})}{\sigma^2(D_{Cin})} = 1 \quad (1)$$

Hipótesis de investigación

La precisión de los diámetros de fibra obtenidos con un colector “convencional”, es menor a la precisión de los diámetros de fibra obtenidos con un colector “cinemático”, lo cual se expresa en la Ecuación 2.

$$\frac{\sigma^2(D_{Con})}{\sigma^2(D_{Cin})} > 1 \quad (2)$$

1.5 Justificación

A pesar de la amplia aceptación que tiene el proceso de electrohilado en la fabricación de andamios celulares a nivel laboratorio, la técnica presenta serias limitaciones en cuanto a aspectos de precisión. Geoffrey Mitchell ⁶ un investigador con enfoque tecno-científico califica al electrohilado como una técnica “**engañosamente simple**” (Fernandes & Bártolo, 2011) debido a su sencilla implementación tecnológica con aparatos convencionales de laboratorio, pero compleja en cuanto a la obtención de materiales en condiciones de repetibilidad y reproducibilidad. Además, el autor señala que la falta de control y la baja precisión asociada al proceso son las principales causas por las cuales la técnica no ha incursionado plenamente a niveles de fabricación industrial.

De tal manera que la **utilidad de la investigación** propuesta para este trabajo pretende contribuir a la generación de conocimiento que podría permitir el desarrollo de una técnica de electrohilado más controlada, capaz de permitir la fabricación de andamios celulares de mayor calidad científica y tecnológica.

Por otra parte también se puede atribuir una **utilidad metodológica** a esta investigación, ya que el enfoque de diseño cinemático propuesto para conseguir el aumento de precisión, es una estrategia ampliamente utilizada para desarrollar aparatos de laboratorio (Bradick, 1960) (Maxwell, 2003), máquinas industriales (Rothenhofer, Slocum, & Kitajima, 2013) (Slocum & Weber, 2003) e instrumentos de alineación (U.S. Patente nº US 6217232 B1,

⁶ Geoffrey Mitchell además es vice director del Centro para el Rápido Desarrollo de Productos Sustentables (CDRSP) en el instituto politécnico de Leiria Portugal. Esta institución está calificada internacionalmente como excelente, siendo sus alcances la ciencia, tecnología, y generación de valor para la industria.

2001) (U.S. Patente nº US 6234687 B1, 2001), pero el cual la cual no ha sido utilizada en el campo de la fabricación de andamios celulares electrohilados.

Además, el enfoque cinemático aporta algunas ventajas, entre las que se encuentran: los niveles de precisión de hasta centenas de nanómetros, y los bajos costos de manufactura los cuales no requieren grados de tolerancia estrictos para funcionar adecuadamente.

1.6 Objetivos

General

Llevar a cabo un estudio comparativo entre la precisión en los diámetros de fibra obtenidos con un colector de fibras que permite alta precisión en el parámetro distancia capilar a colector (colector cinemático), y un colector de fibras de precisión típica en el parámetro distancia capilar a colector (colector convencional).

Específicos

1. Diseñar y construir un colector de fibras que represente la naturaleza mecánica de un colector de fibras tradicional, en el cual el posicionamiento se hará a partir de mediciones manuales (colector convencional).
2. Diseñar y construir un colector de fibras que reinterprete al colector convencional, donde el posicionamiento se hará mediante una conexión cinemática desmontable (colector cinemático).
3. Fabricar dos grupos de membranas electrohiladas, utilizando los colectores “convencional” y “cinemático”.
4. Caracterizar la morfología de las membranas electrohiladas, a partir de mediciones de: área del cúmulo depositado, circularidad del cúmulo, y diámetro de fibra.
5. Cuantificar la precisión de medida para el área de cúmulo depositado, la circularidad del cúmulo y el diámetro de fibra obtenidos bajo condiciones de repetibilidad en los colectores “convencional” y “cinemático”.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte

Parece no existir un estudio en el cual se aborde el rediseño de la tecnología de electrohilado en base a diseño cinemático. Sin embargo, es posible establecer un estado del arte a través de la reseña de casos en los cuales se reporta el uso de principios de diseño cinemático para aumentar el rendimiento general de sistemas, y en específico conseguir incrementos de precisión.

Uno de los estudios más importantes que pone en contexto la magnitud de los niveles de precisión logrados mediante conexiones mecánicas de restricciones exactas, es el expuesto por Alexander Slocum (2010). En dicho trabajo se presenta una tabla que resume los niveles de repetitividad concernientes a una clasificación compuesta por tipos de conexiones mecánicas más usuales (conexión cilindro-barreno, conexión cinemática flexible, conexiones flexibles, conexión cuasi-cinemática y conexión de restricciones exactas), los datos muestran que las conexiones basadas en ajustes mecánicos consiguen los peores valores de precisión, rondando las centenas de micra; mientras que los índices de precisión mejoran conforme se optimiza el número de restricciones de movimiento, como en el caso de las conexiones de restricciones exactas, capaces de alcanzar niveles de hasta **decenas de nanómetros**.

En términos cinemáticos, el electrohilado puede entenderse como un proceso en el cual se alinea un elemento emisor de disolución polimérica, respecto a un elemento colector de fibras. Entre estos dos elementos existe una distancia de separación que es el espacio en el cual la disolución se transforma fibras.

Este mismo principio de alineación y separación entre dos elementos, es el que se buscó para la hacer una revisión del estado del arte, y es el que se muestra a continuación. Podrá observarse que las soluciones de tipo cinemático, consisten en el contacto entre dos cuerpos, es decir en conexiones mecánicas.

Conexiones cinemáticas de James Clerk Maxwell y Lord Thompson

Uno de los fundadores de lo que en la actualidad se conoce como diseño cinemático, fue el físico inglés James Clerk Maxwell, quien en un artículo sobre el diseño de aparatos científicos (Maxwell, 2003) expone algunos de los principios fundamentales para desarrollar aparatos de precisión. Además de establecer teoría, Maxwell propone una de las conexiones cinemáticas más reconocidos hasta la fecha, la cual permitía la alineación relativa entre dos cuerpos por medio de un arreglo geométrico que restringe exactamente seis grados de libertad. Similar a la conexión de Maxwell, Lord Thompson (Slocum & Weber, 2003) presenta una conexión cinemática parecida a la anterior, pero en este caso el arreglo geométrico es simétrico, ver figura 3. La importancia de estas conexiones es que son ampliamente conocidas dentro de los círculos de ingeniería de precisión, y siguen teniendo valides teórica y práctica.

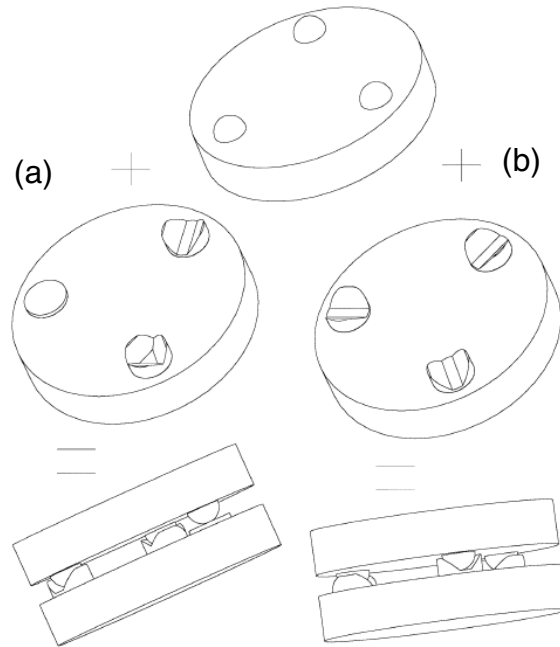


Figura 3 Conexiones cinemáticas desmontables clásicas:
(a) conexión de Lord Thompson, (b) conexión de Maxwell.
 Adaptado de (Slocum & Weber, 2003).

Aparato/método para alinear fibra óptica con un dispositivo opto electrónico

En el campo de la transmisión de datos Duesman et al. (U.S. Patente nº US 6217232 B1, 2001) presenta una patente en la cual detalla una invención pensada para montar un dispositivo opto electrónico a un sustrato, y después alinearlo con una fibra óptica. Figura 4.

En esta patente está de manifiesto el uso de la teoría del diseño cinemático, ya que la fibra óptica se alinea al dispositivo opto electrónico por medio de una geometría en forma de V la cual al estar en contacto con la geometría cilíndrica de la fibra óptica permite una fácil alineación, además de una solución de bajo costo, en palabras del propio autor.

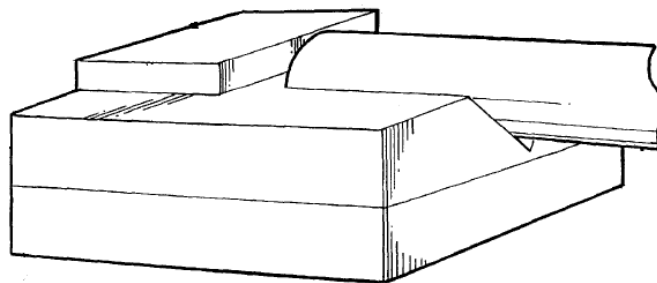


Figura 4 Sistema mecánico para alinear una fibra óptica y su receptor.

Método y ensamble para auto alinear un dispositivo opto electrónico.

En el campo de las telecomunicaciones Hall et al (Estados Unidos de Norteamérica Patente n° US 6234687 B1, 2001), presenta una invención para auto alinear un dispositivo opto electrónico y acoplamiento de fibra óptica, que requieren de una alineación precisa. Ver Figura 5.

En la arquitectura propuesta, la auto alineación se consigue por medio de un conjunto de ranuras en forma de V, que permanecen en contacto con pequeñas barras cilíndricas. Con lo cual se restringe cualquier posible movimiento entre emisor y receptor, ya que la arquitectura contempla la restricción de seis grados de libertad.

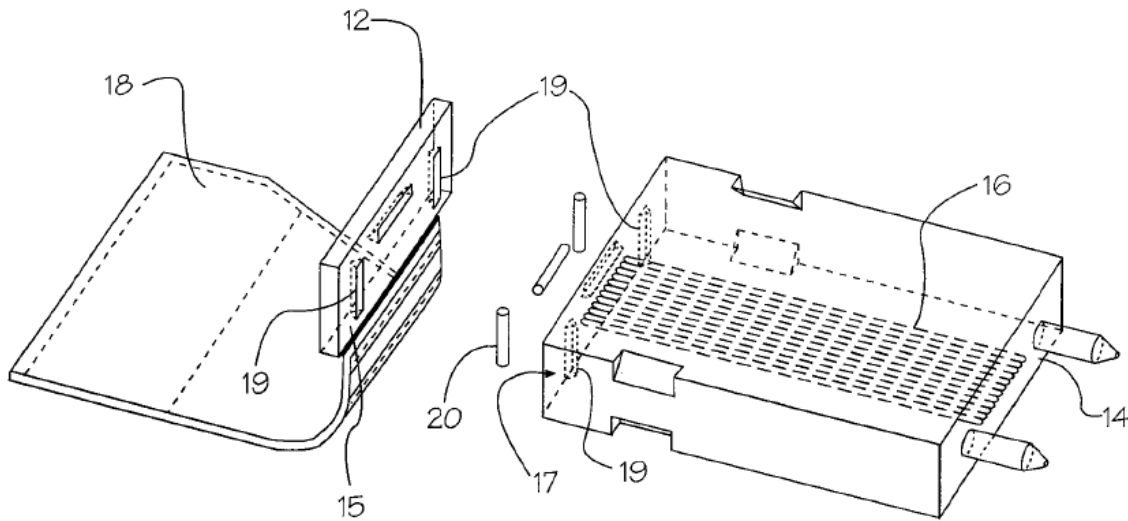


Figura 5 Patente de Hall et al. para auto alinear por medio de una conexión mecánica.
Adaptado de (U.S. Patente n° US 6234687 B1, 2001).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Ingeniería de tejidos

La ingeniería de tejidos, se trata de un campo multidisciplinario que involucra los principios y métodos de ingeniería y de las ciencias de la vida, con el fin de entender la estructura y funciones de tejidos humanos, así como de desarrollar sustitutos biológicos que permitan recuperar, mantener, o mejorar funciones biológicas (Sachlos & Czernuszka, 2003).

Para poner en contexto las bondades de la ingeniería de tejidos, Hollister (Hollister, 2005) hace notar que dentro de la medicina se distinguen dos paradigmas clásicos en cuanto a la reparación de tejidos/órganos, uno es el injerto de tejidos/trasplante de órganos, y otro es el remplazo con materiales sintéticos. Ante las limitaciones debidas a la cantidad de donantes, y la poca eficiencia que se tiene para conseguir materiales tan complejos como los del cuerpo humano, aparece la ingeniería de tejidos.

El concepto propuesto por este campo, consiste en trasplantar células, genes y proteínas dentro de un material poroso degradable conocido como **andamio celular**, el cual se utiliza para estimular la formación de tejido nuevo, que puede utilizarse para mejorar o reemplazar funciones biológicas.

*El concepto de la **ingeniería de tejidos** consiste en utilizar materiales porosos integrados con células, genes y proteínas, lo cuales estimulan la formación de nuevo tejido.*

Ingeniería de tejidos en aplicaciones clínicas

A nivel clínico la ingeniería de tejidos tiene aplicaciones prácticas en diferentes campos para reemplazar piel, cartílago, hueso, componentes cardiovasculares, páncreas entre otros (Rana & Rana, 2015) (Liu, Xia, & Czernuszka, 2007).

*Según la definición de ingeniería de tejidos del Instituto Nacional para la Salud de Estados Unidos, la ingeniería de tejidos está **revolucionando la forma en la cual se cuida la salud y la calidad de vida de millones de personas alrededor del mundo.***

Desde la **perspectiva clínica**, la ingeniería de tejidos implica las siguientes etapas:

- Tomar una biopsia del tejido a trabajar.
- El tejido se lleva al laboratorio donde las células se multiplican millones de veces.
- Una vez que las células se han multiplicado, se transfieren a un andamio donde se da la formación de tejido.
- El tejido formado se estimula en un bio-reactor, donde permanece hasta su utilización en la clínica.

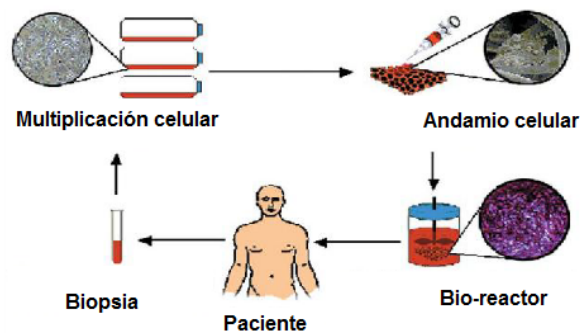


Figura 6 Aplicación clínica de la ingeniería de tejidos.
Adaptado de (Rana & Rana, 2015).

2.2.1 A Tejidos biológicos

Concepto de tejido

Las células de los organismos multicelulares se organizan para formar relaciones estructurales y funcionales conocidas como tejidos. En el cuerpo humano se clasifican cuatro tipos de tejidos básicos: epitelio, tejido conjuntivo, músculo y tejido nervioso (P. Gartner, 2001). Cada uno de los tejidos del cuerpo se conforma de células, una matriz extracelular y moléculas circundantes en interacción.

*Un **tejido** es un conjunto organizado de células que funcionan de manera colectiva.*

Clasificación de los tejidos biológicos:

Tejido epitelial

Este tejido reviste la superficie del cuerpo, tapiza cavidades corporales y forma glándulas. Las células epiteliales siempre se ubican una junto a la otra, donde el espacio que hay entre ellas es muy cerrado y carece de estructura. La morfología de estas células es plana, cúbica y cilíndrica.

Tejido muscular

Este tipo de tejido es responsable del movimiento corporal. Las células del tejido muscular se caracterizan por su morfología alargada y por contener en su citoplasma una gran cantidad de proteínas contráctiles las cuales en su actividad pueden producir el movimiento de un órgano completo.

Tejido nervioso

Este tejido se encarga de transmitir e integrar información del medio externo para controlar las actividades del organismo. Las células del tejido nervioso (neuronas) son especialistas en la transmisión y recepción de pulsos eléctricos. Generalmente este tipo de células están asociadas a órganos sensoriales para la realización de funciones.

Tejido conjuntivo

Este tejido subyace a los otros tres tejidos a nivel estructural y funcional. Las células del tejido conjuntivo están muy separadas unas de otras, el espacio que hay entre las células es ocupado por una sustancia producida por las mismas células, la cual recibe el nombre de matriz extracelular.

Matriz Extracelular

Cada uno de los cuatro tejidos del cuerpo (tejido epitelial, muscular, nervioso y conjuntivo) poseen características propias que les confieren funcionalidades específicas, sin embargo todos los tejidos se forman a base de células y una matriz extracelular (P. Gartner, 2001).

La matriz extracelular (MEC) consiste en una estructura formada por macromoléculas inanimadas, elaborada y eliminada por las propias células, tiene una composición y topología únicas. Permite el desarrollo de las funciones celulares como la división, diferenciación, y apoptosis, por tal motivo la MEC está involucrada en la formación y regeneración de tejidos.

Su composición es a base de tres tipos de moléculas:

(1) **proteínas estructurales** como el colágeno que proporciona resistencia mecánica y las elastinas que le confieren elasticidad; (2) **glucoproteínas especializadas** como la fibrilina, fibronectina y laminina; y (3) **proteoglicanos** como la condrotina, heparan así como el ácido hialurónico (Thiriet, 2011).

Se sabe que la matriz extracelular participa en múltiples procesos normales y patológicos, por ejemplo tiene actividad importante en estados inflamatorios y en la diseminación de células cancerosas, además se han documentado alteraciones de la matriz en enfermedades como la artritis reumatoide y la osteoartritis (Murray, Bender, & Botham, 2010).

Considerando la importancia de la matriz extracelular en varios procesos celulares fundamentales, se ha desarrollado un vasto número de modelos de cultivo celular para estudiar la relación entre las propiedades bio-químicas y bio-físicas con el origen de comportamientos celulares, algunos de estos estudios de frontera son llevados a cabo para entender los mecanismos de algunas enfermedades hasta ahora desconocidos (Frantz, Stewart, & Weaver, 2010).

2.2.1 B Andamios celulares

El **andamio celular** es uno de los elementos indispensables para la investigación y el desarrollo de la ingeniería de tejidos. Su principal función es la de servir como sustrato para la adhesión celular, para lo cual debe tener las siguientes características: biocompatible, biodegradable, altamente poroso, alta proporción superficie/volumen, mecánicamente fuerte y maleable (Guoping, Takashi, & Tetsuya, 2002).

Para la ingeniería de tejidos, el andamio celular representa un papel importante, ya que a través de este se manipulan las funciones celulares, y la formación de tejido nuevo. Las células se adhieren al andamio, proliferan y secretan su propia matriz extracelular, reemplazando así al andamio.

*En el enfoque de la ingeniería de tejidos, un andamio celular temporal se utiliza como un sustrato adhesivo y como soporte físico que guía **la formación de nuevos órganos**.*

Goupin Chen

Sobre los procesos de fabricación, existen numerosos métodos citados en la literatura, en específico Gouping Chen et al (Guoping, Takashi, & Tetsuya, 2002), clasifica los procesos de manufactura para andamios celulares en cuatro grupos diferentes:

Colada con disolvente: Este proceso permite moldear estructuras a partir de una disolución polimérica y un sistema de partículas solubles en agua. Una vez que se vierte estos dos componentes a un molde, el solvente se evapora, y las partículas se retiran con agua, dejando una estructura porosa. Ver figura 7.

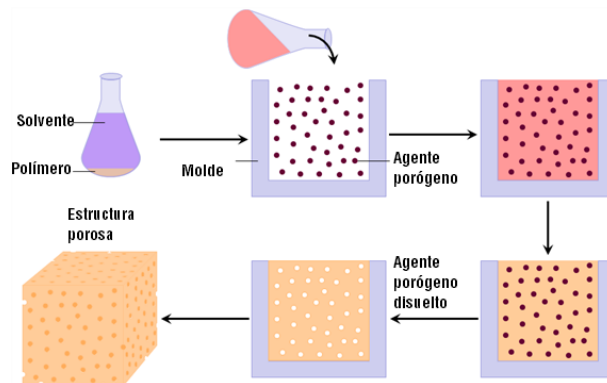


Figura 7 Proceso de fabricación por colada de disolvente.
Adaptado de (Mallick, Tripathi, & Srivastava, 2015).

Redes de fibras: Este proceso de naturaleza eléctrica, permite obtener membranas, compuestas por fibras delgadas, obtenidas mediante el sometimiento de una disolución polimérica a campos eléctricos. Ver figura 8.

La ventaja de este procedimiento es la facilidad para combinar diferentes tipos de polímeros que permiten obtener estructuras altamente personalizadas.

La principal desventaja de esta técnica es la dificultad para controlar el tamaño y forma de los poros formados.

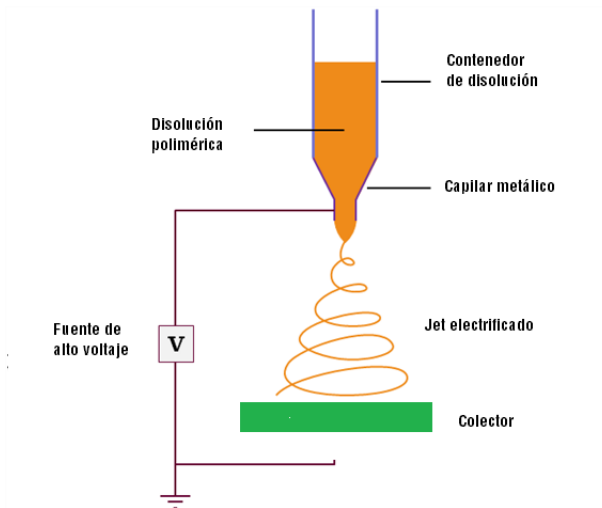


Figura 8 Proceso de fabricación por redes de fibras (electrohilado)

Separación de fase: Consiste en la separación de fases inducidas térmicamente, la remoción del solvente es la que da origen a la formación de poros, los cuales pueden controlarse a través de las condiciones de separación, figura 9.

Una de las desventajas de este proceso se deriva del uso de solventes orgánicos, cuyos restos pueden ser tóxicos para las células.

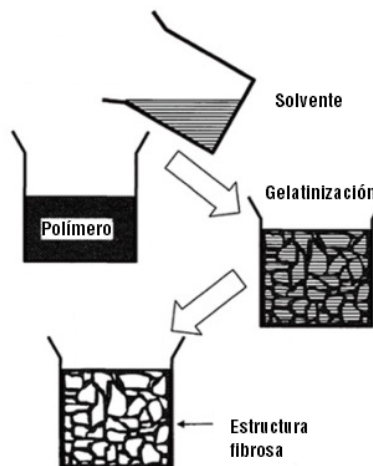


Figura 9 Proceso de fabricación por separación de fases.
Adaptado de (*Electrospinning for Pharmaceutical Application*, 2016).

Fabricación sólida de forma libre: Con esta tecnología es posible fabricar estructuras personalizadas. Consiste en el modelado de la estructura a través de métodos de diseño asistido por computadora CAD, y su posterior interpretación por una máquina capaz de fabricar dicha estructura capa por capa hasta generar la geometría completa, ver figura 10.

Entre las tecnologías de fabricación se encuentran: estéreolitografía (SLA), fabricación laminada de objetos (LOM), sinterizado selectivo por láser (SLS), modelado por deposición fundida (FDM), inyección de tinta (IJP), por sus siglas en inglés respectivamente.

Las ventajas de estos procesos son la posibilidad de fabricar geometrías con arquitecturas internas delicadas (tamaño de poro, forma del poro, interconectividad, y geometría), que no pueden obtenerse por métodos tradicionales.

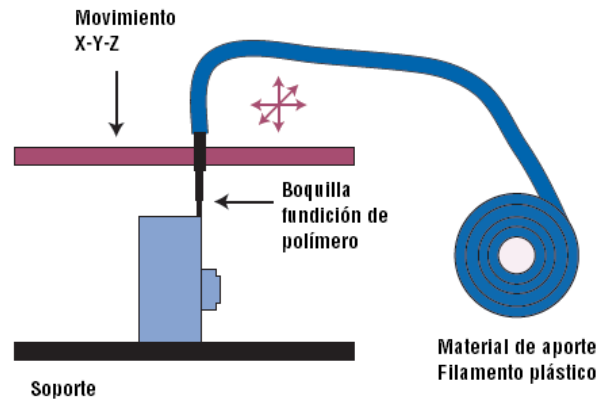


Figura 10 Proceso de fabricación sólida de forma libre (impresión 3D)

Control de la arquitectura de andamios

Si bien la aplicación de la ingeniería de tejidos ha tenido éxito clínico en la regeneración de piel y cartílago, la regeneración de órganos como hígado y riñón no ha tenido éxito. Una de las razones es que dichos órganos requieren arquitecturas complejas, compuestas de múltiples células, y redes de abundantes capilares, características que van más allá de los procesos actuales de fabricación.

2.2.1 C Electrohilado

El electrohilado es una técnica para generar estructuras fibrosas conformadas por redes de fibras cuyos diámetros se encuentran en escala micro y nanométrica. El procedimiento parte de una disolución polimérica, la cual se transforma en fibras a través de la aplicación de fuerzas electrostáticas. Debido al tipo de requerimientos tecnológicos asociados a la técnica, algunos investigadores catalogan al electrohilado como uno de los procedimientos más simples para la obtención de nanofibras (Dan & Younan, 2004), (Rutledge & Fridrikh, 2007), lo cual ha permitido su amplia aceptación dentro de laboratorios de investigación.

Historia del proceso

En 1900 **John Francis Cooley** un inventor profesional de la ciudad de Nueva York publica una patente en la cual describe el diseño de un aparato que permite **separar el líquido volátil de una sustancia fija mediante fuerzas eléctricas** (US Patente nº 692,631, 1902).

Dicha invención estableció las bases tecnológicas para el desarrollo del proceso de electrohilado⁷ de la actualidad y por lo tanto se considera un pilar fundamental para la génesis del proceso, figura 11.

En cuanto al desarrollo teórico del proceso de electrohilado, uno de los trabajos más trascendentales es el desarrollado por el físico británico **Sir Geoffrey Ingram Taylor** (Taylor, 1964) en la década de 1960 el cual contribuyó al esclarecimiento del proceso de electrohilado mediante modelos matemáticos para describir la geometría cónica (cono de Taylor) que adopta el fluido en la punta del capilar ante los efectos del campo eléctrico.

A pesar de que la tecnología y los estudios teóricos del proceso ya había comenzado a desarrollarse con anterioridad, el nombre de electrohilado (electrospinning) fue popularizado por el científico americano **Darrell Reneker** (Doshi & Reneker, 1995) en la década de 1990, cuando demostró la amplia variedad de polímeros (polímeros solubles en agua, biopolímeros y polímeros de cristal líquido) que podían utilizarse para la obtención de nano fibras, también realizó estudios para establecer los parámetros gobernantes del proceso y señaló potenciales aplicaciones (refuerzos en materiales compuestos, textiles, membranas de separación, y como una ruta para la obtención de textiles no tejidos y como apósito para heridas).

⁷ La invención de John Francis Cooley sigue siendo válida en la actualidad, a tal manera que uno de los mayores cambios es la sustitución del mecanismo de carga, por una fuente de voltaje de estado sólido.

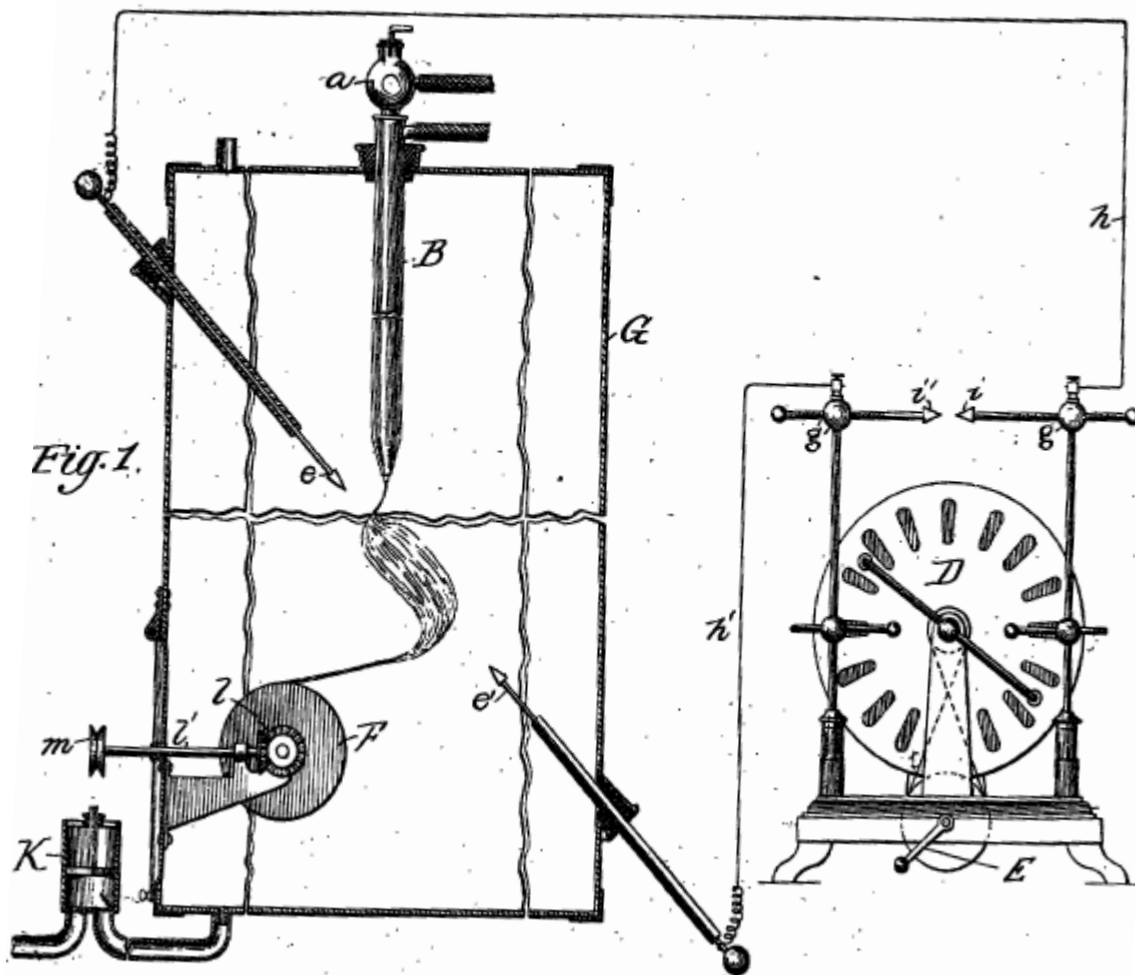


Figura 11 Aparato para obtener fibras de John Francis Cooley.
 Adaptado de (US Patente nº 692,631, 1902).

Descripción del proceso de electrohilado

El proceso parte con un capilar metálico⁸ en el cual se hace fluir lentamente una disolución polimérica de tal manera que se forme una gota en la punta. Mediante una conexión eléctrica entre el ánodo de una fuente de alto voltaje conectado al capilar, se eleva el potencial eléctrico de la disolución para generar una repulsión entre las cargas eléctricas de la superficie de la gota, provocando una fuerza que actúa contraria a la tensión superficial, con lo cual se deforma la geometría de dicha gota hasta la formación de una geometría cónica nombrada **cono de Taylor**. Después de cierta magnitud de potencial eléctrico el cono de Taylor se vuelve inestable y a partir de su punta se emite un **filamento de fluido**⁹. El filamento seguirá una trayectoria que lo lleve a depositarse sobre un cuerpo metálico conectado al cátodo de la fuente de voltaje. Este cuerpo metálico llamado colector de fibras, está posicionado estratégicamente respecto al capilar y es el lugar donde se colectan las fibras poliméricas obtenidas. Durante el trayecto que sigue el filamento, éste se acelera, adelgaza y estira experimentando un conjunto de inestabilidades. El diagrama del proceso de electrohilado se muestra en la figura 12.

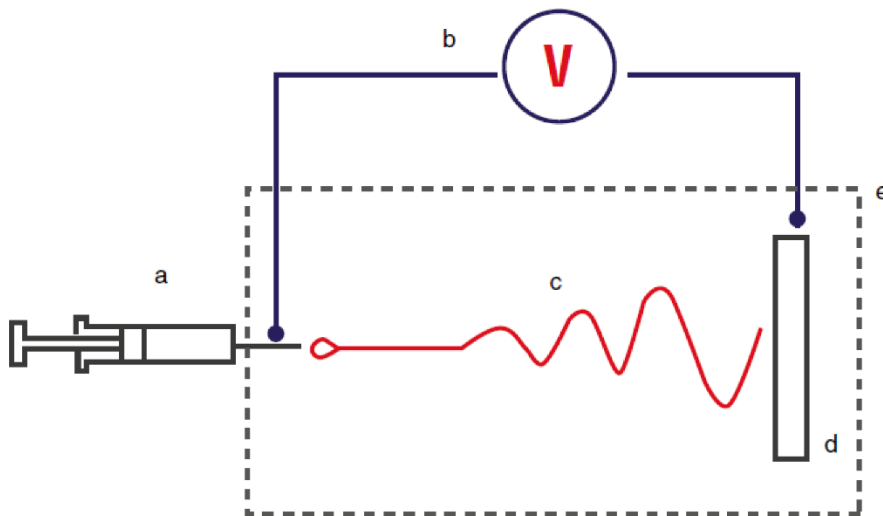


Figura 12 Configuración básica de la técnica de electrohilado

a) contenedor de la disolución polimérica, b) fuente de alto voltaje, c) filamento de fluido (jet), d) colector de fibras, e) cabina de trabajo

A pesar de que el procedimiento de electrohilado parece simple, los fenómenos físicos involucrados son complejos, el proceso puede subdividirse en las siguientes etapas: (i) carga eléctrica de la disolución, (ii) formación del cono y filamento de fluido, (iii) adelgazamiento

⁸ El capilar también puede ser de vidrio con un alambre de cobre en el centro para lograr la polarización eléctrica.

⁹ En la literatura es común encontrar que a este filamento se le llame jet, aun cuando el idioma de la publicación sea español.

del filamento, (vi) inestabilidades del filamento y (v) recolección del filamento (solidificación) (Rutledge & Fridrikh, 2007).

Etapas del proceso de electrohilado

Etap 1: carga eléctrica de la disolución

La carga eléctrica en el proceso de electrohilado ocurre por el contacto entre la disolución y el ánodo de la fuente de alto voltaje. Dependiendo de la naturaleza del fluido, así como de la polaridad de la fuente de voltaje, será la naturaleza de los portadores de carga en la gota y en el filamento.

Etap 2: formación del cono y filamento

Esta es la etapa inicial en la formación de las fibras. Para cada disolución polimérica existe un nivel de potencial eléctrico con el cual se consigue que la gota adopte la forma de un cono (*cono de Taylor*). Por encima de este nivel de potencial eléctrico se consigue expulsar un filamento de fluido a partir de la punta del cono. Generalmente se evita aplicar potenciales mayores a este segundo nivel de potencial ya que provoca la formación de múltiples filamentos con lo cual el proceso se vuelve caótico y los niveles de precisión disminuyen debido a que es difícil controlar la dirección hacia la cual apuntan los filamentos.

Etap 3: adelgazamiento del filamento

Esta etapa consiste en la formación de un delgado filamento de fluido continuo que se forma a partir de la punta del cono de Taylor. El filamento sigue una trayectoria en dirección al colector de fibras.

Etap 4: inestabilidades del filamento

Durante el viaje del filamento hacia el colector de fibras, este sucumbe ante una o más inestabilidades que distorsionan su movimiento. Dos de las inestabilidades más comunes son la de latigazos (*whipping*) y la del rompimiento de gota (*droplet break-up*). La primera de las inestabilidades consiste en movimientos laterales crecientes que desvían la dirección del filamento, la segunda inestabilidad consiste en el rompimiento del filamento en forma de múltiples gotas. Este tipo de inestabilidades pueden presentarse simultáneamente o de manera independiente, y contribuyen a la falta de control que se tiene durante el proceso.

Etap 5: recolección del filamento (solidificación)

Se trata de la última etapa del proceso de electrohilado, ocurre cuando el filamento de fluido que viaja por el aire se impacta con un cuerpo conductor conectado eléctricamente con el cátodo de la fuente de voltaje. Dentro del argot del electrohilado el cuerpo conductor se conoce como **colector de fibras** y es uno de los elementos con más posibilidades de innovación ya que puede utilizarse para manipular las líneas de campo eléctrico con el fin de guiar la deposición de fibras. El colector de fibras más simple consiste en una placa vertical con la cual se consigue una membrana de fibras aleatorias sobrepuestas una sobre otra.

Descripción del aparato de electrohilado

El aparato convencional para el proceso de electrohilado consiste en los siguientes elementos: (a) bomba de infusión, (b) Capilar, (c) fuente de alto voltaje, (d) un colector de fibras y (e) cabina. Un ejemplo de aparato de electrohilado de nivel laboratorio se muestra en la figura 13.



Figura 13 Ejemplo de un aparato de electrohilado.

Fotografía tomada del laboratorio electrohilado del Instituto Nacional de Rehabilitación INR México.

2.2.2 Ingeniería de precisión

La ingeniería de precisión se reconoce como una ciencia especializada conformada por conocimientos de las áreas de : diseño, metrología y manufactura (Schellekens, Vermeulen, Vermeulen, Wetzels, & Pril). El surgimiento de esta ciencia obedece a la creciente necesidad de máquinas, instrumentos y productos de consumo con requerimientos de comportamientos altamente precisos. Uno de los detonantes de la ingeniería de precisión es el desarrollo de la industria de circuitos integrados (Hutcheson & Hutcheson, 1995) en la década de los 60's, en donde se tenía la necesidad de colocar la mayor cantidad de transistores en una oblea de silicio, lo cual implicaba máquinas especiales capaces de posicionar con precisiones en el orden de nanómetros.

Sin embargo, los sistemas de alta precisión no son exclusivos para fines industriales, sus alcances también están presentes en dispositivos de consumo común por ejemplo los sistemas de almacenamiento óptico (DVD), en los cuales los mecanismos se mueven con precisiones nanométricas.

2.2.2 A Elementos de precisión

Una máquina puede entenderse como un sistema conformado por un conjunto de elementos que interactúan entre sí para cumplir una función. **El desempeño** de una máquina puede cuantificarse a través de los conceptos de **exactitud, resolución y precisión**. De tal manera que existen fuentes de error que distorsionan el desempeño de una máquina, las cuales pueden agruparse en tres grupos: geometría, cinemática y dinámica.

Fuentes de error debidas a la geometría

La geometría está presente en todo diseño, cada elemento de una máquina tiene cierta geometría, la cual comienza gestándose a partir de las funciones que desempeñará. Los errores de tipo geométrico se generan debido a que los procesos de manufactura generan geometrías con errores, es decir no se obtienen geometrías perfectas, las cuales solo existen como concepto.

Fuentes de error debidas a efectos cinemáticos

Las máquinas en general no son estáticas, tienen asociados movimientos descritos por relaciones cinemáticas. Sin embargo, estas descripciones son modelos matemáticos que se ven alterados en su implementación práctica. Algunos factores que disminuyen el desempeño cinemático son los mecanismos, actuadores, sensores y partes que tienen asociado un valor de desviación respecto a su comportamiento ideal.

Fuentes de error debidos a efectos dinámicos

Las máquinas contienen partes que experimentan estados de aceleración, por tal motivo existen efectos dinámicos que repercuten en el desempeño de una máquina. Para tales efectos es importante seleccionar perfiles de movimiento adecuados, evitar el juego entre piezas, diseñar para requerir la mínima cantidad de fuerza, asegurar simetría, y maximizar la rigidez de los elementos de una máquina.

2.2.2 B Diseño cinemático

El desarrollo de la ingeniería de precisión ha generado conocimiento específico obtenido a partir bases teóricas y su implementación práctica. Este conocimiento generalmente está expresado en forma de filosofías y principios de diseño, es en este sentido es como debe entenderse al **Diseño Cinemático**.

El Diseño Cinemático es una filosofía de diseño sustentada en principios, su principal característica radica en la restricción exacta de los grados de libertad de movimiento entre las partes de una máquina, con el fin de establecer estados de movimiento determinísticos, altos niveles de precisión y procesos de manufactura económicos.

El enfoque cinemático es conveniente en el diseño de máquinas e instrumentos en los cuales mover, posicionar y/o alinear se convierten en un factor crítico que determina el desempeño del sistema. Otra ventaja del diseño cinemático es la posibilidad de validar teóricamente el desempeño cinemático de un sistema, esto se debe a la posibilidad de conseguir la máxima rigidez cualitativa en los elementos estructurales, así como el determinismo en los estados de movimientos.

Uno de los primeros artículos formales sobre el diseño cinemático es el del científico británico James Clerk Maxwell (Maxwell, 2003), el cual justifica las bondades del enfoque cinemático con los beneficios que se consiguen y advierte sobre los inconvenientes de sobre restringir la cinemática de los cuerpos.

*Un cuerpo **sobre restringido** en más de seis grados de libertad estará sujeto a esfuerzos internos que provocaran **deformaciones** imposibles de determinar sin la obtención de mediciones micrométricas exactas.*

James Clerk Maxwell

El enunciado de Maxwell hace notar que debido a estados cinemáticos de sobre restricción las piezas de una máquina podrán tener cambios de geométricos que afectarán la calidad en el posicionamiento y de estados de movimiento.

En la siguiente sección se complementará el marco teórico que da sustento tecnológico al diseño cinemático. La teoría expuesta proviene de un compendio de principios expuestos

por **Douglas L. Blanding** en su libro sobre **diseño de máquinas usando principios cinemáticos** (Blanding, 1999).

2.2.2 B1 Conexiones mecánicas

El diseño de máquinas desde un enfoque cinemático, se basa en **conexiones mecánicas** entre un cuerpo y un marco de referencia, con lo cual se consiguen estados de movimiento deseados.

Grados de libertad

El diseño cinemático parte del hecho de que los cuerpos rígidos poseen **seis grados de libertad** de movimiento independientes entre sí, de los cuales tres son movimientos de traslación, y tres son movimientos de rotación. Por lo tanto, el diseño de una conexión mecánica debe contemplar cada uno de estos seis grados de libertad para establecer estados de movimiento.

En el estudio cinemático expuesto por Blanding, se adopta la convención de utilizar el símbolo **T** para referenciar un movimiento de **traslación** y **R** para denotar un movimiento **rotacional**. La convención de los ejes cartesianos se muestra en la figura 14.

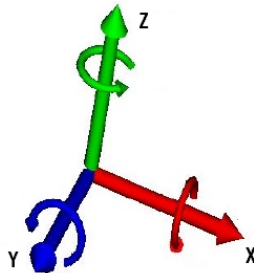


Figura 14 Marco de referencia basado en coordenadas rectangulares.

Restricciones (*Constraints*)

El término de **restricción** se utiliza para denotar la **disminución de grados de libertad** debida al establecimiento de una conexión mecánica entre un cuerpo y un marco de referencia.

La disminución de los grados de libertad de un cuerpo se consigue a través de **elementos de restricción**.

En una conexión cinemática los elementos de restricción son cuerpos fijos a un marco de referencia, que hacen contacto puntual con el cuerpo de interés. En esta situación cada restricción tiene asociada una **línea de restricción** la cual es una línea imaginaria que se forma perpendicularmente a las superficies de contacto. La representación esquemática de una restricción se hace por medio de una barra cuyo eje coincide con la línea de restricción y se denota por la letra C, figura 15.

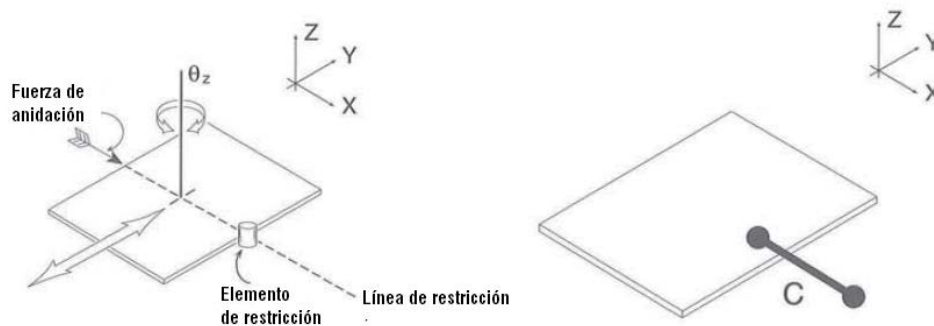


Figura 15 Concepto de restricción entre un cuerpo y un marco de referencia.
Adaptado de (Blanding, 1999).

Sobre restricción

El término **sobre restricción** se utiliza para describir una condición cinemática en la cual se establece una conexión mecánica entre un cuerpo y un marco de referencia por medio de dos o más restricciones que se sobreponen sobre la misma línea de restricción, figura 16.

La razón práctica por la cual el estado de sobre restricción se evita, es debido a que los elementos de restricción provocarán dos posibles estados: **deformaciones** o **juego**, los cuales disminuyen la precisión asociada a un sistema.

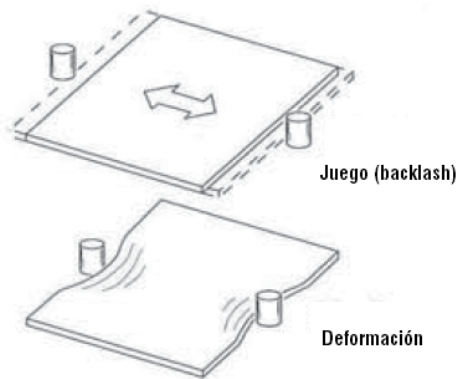


Figura 16 Sobre restricción cinemática de un cuerpo.
Adaptado de (Blanding, 1999).

Restricción exacta

El término **restricción exacta** se utiliza para describir una condición cinemática en la cual se establece una conexión mecánica entre un cuerpo y un marco de referencia de tal manera que se restringen exactamente seis grados de libertad para conseguir una estructura, o permitiendo uno o más para conseguir el movimiento deseado.

Complemento entre grado de libertad y restricción

El inverso de un grado de libertad (R) es una restricción de movimiento (C). En un sistema exactamente restringido la suma de los grados de libertad R 's y las restricciones C 's es igual a seis.

Fuerza de anidación (*nesting force*)

La fuerza de anidación es un concepto utilizado en el diseño de conexiones cinemáticas. Se trata de una fuerza cuya línea de acción coincide con la línea de restricción, su función es mantener el contacto físico entre el cuerpo y el elemento de restricción.

2.2.2 B2 Elementos de restricción

Los elementos de restricción son la tecnología que permiten restringir los grados de libertad de un cuerpo. A continuación, se presenta un conjunto de cuatro elementos de restricción: cilindro y barreno, perfil V, barra delgada, lámina flexible.

Cilindro y barreno (*pin and hole*)

Se trata de un elemento de restricción en el cual un cilindro se coloca dentro de un barreno, esta conexión es muy utilizada en aplicaciones de baja precisión.

Perfil V

Es un elemento de restricción en el cual un cilindro y/o elemento esférico hace contacto con una matriz en forma de V, figura 17. Este tipo de conexión se utiliza para hacer conexiones de restricciones exactas, y por lo tanto en aplicaciones de **alta precisión**.

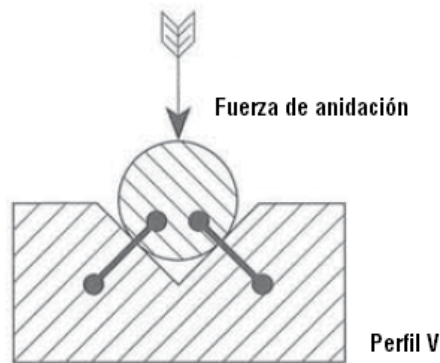


Figura 17 Elemento de restricción tipo V.
Adaptado de (Blanding, 1999).

Barra delgada flexible (*wire flexure*)

Se trata de un **elemento de restricción flexible** considerado con rigidez binaria¹⁰. Permite restringir cinco grados de libertad, tiene una cinemática asociada de (1R, 5C). Geométricamente la restricción se ubica en a lo largo de la barra, figura 18.

¹⁰ De acuerdo con Blanding es válido suponer que una lámina flexible ofrece rigidez binaria ya que el cociente entre la rigidez en tensión o compresión y la rigidez en flexión es de al menos 5 órdenes de magnitud. Incluso demuestra que este comportamiento es independiente del módulo de elasticidad del material.

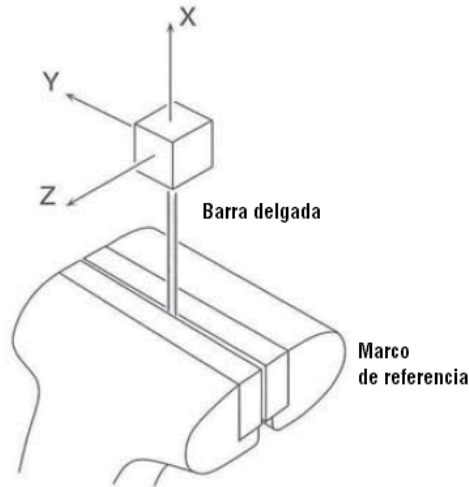


Figura 18 Barra delgada como elemento de restricción.
Adaptado de (Blanding, 1999).

Lámina flexible (*sheet flexure*)

Se trata de un elemento de restricción flexible que se considera de rigidez binaria, debido a que ofrece rigidez o flexibilidad en ciertas direcciones. Este elemento permite restringir tres grados de libertad, tiene una cinemática asociada de (3R, 3C). Geométricamente las restricciones se ubican en el plano que contiene a la lámina, figura 19.

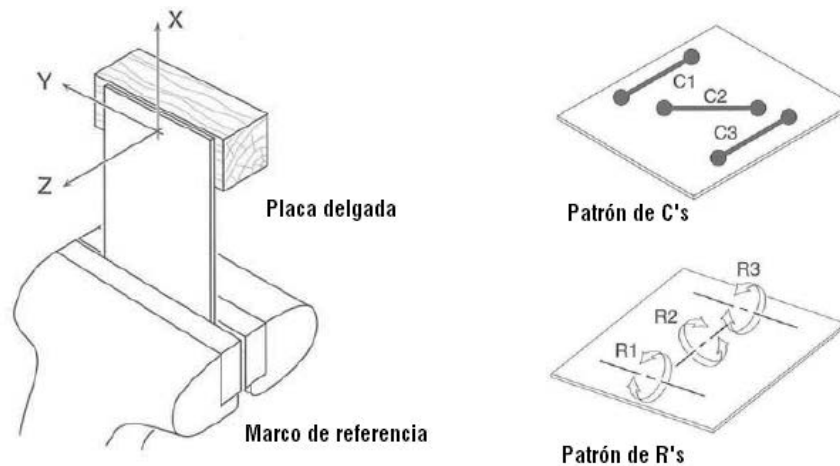


Figura 19 Lámina flexible como elemento de restricción.
Adaptado de (Blanding, 1999).

Equivalencia entre lámina y barra

Debido a que una lámina flexible contiene tres restricciones sobre el plano que la contiene, estas restricciones pueden ser intercambiadas por las restricciones de tres barras delgadas

y conseguir la misma funcionalidad cinemática, figura 20. Esta equivalencia se utiliza práctica y teóricamente, ya que en ocasiones el análisis cinemático es conveniente de visualizar mediante barras.

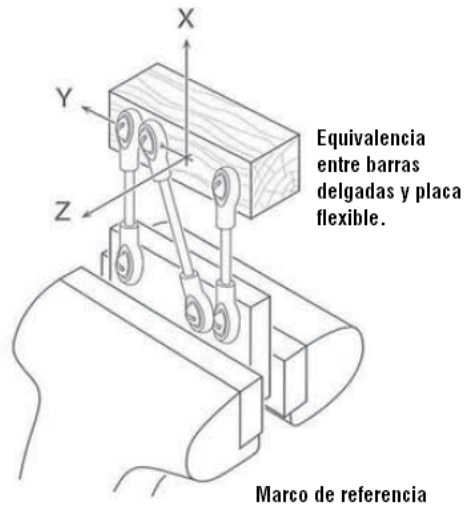


Figura 20 Equivalencia funcional entre barras delgadas y placa flexible.
Adaptado de (Blanding, 1999).

2.2.2 B3 Patrones R/C en hardware

A partir de principios cinemáticos, se ha desarrollado un compendio de conexiones cinemáticas ya conocidas y estudiadas dentro de los círculos del diseño cinemático, para los alcances de este trabajo se presentan un tipo particular de conexiones, que permiten conexiones desmontables con alta precisión.

Conexión desmontable

Se trata de una conexión mecánica exacta entre un cuerpo y un marco de referencia. Las principales cualidades de esta conexión es la facilidad para montar y desmontar, así como los altos niveles de precisión en el posicionamiento del cuerpo respecto al marco de referencia conseguidos.

La implementación de esta conexión generalmente consiste en un arreglo de contactos puntuales y una fuerza de anidamiento (nesting force) normal a cada contacto.

A) Arreglo de tres planos (3 plane pattern)

Es una conexión basada en seis restricciones de contacto puntual, tres de ellas se ubican en el plano inferior, dos en un plano perpendicular al primero, y una última perpendicular a

los otros dos planos, además se coloca una fuerza de anidación perpendicular a cada uno de los contactos, figura 21.

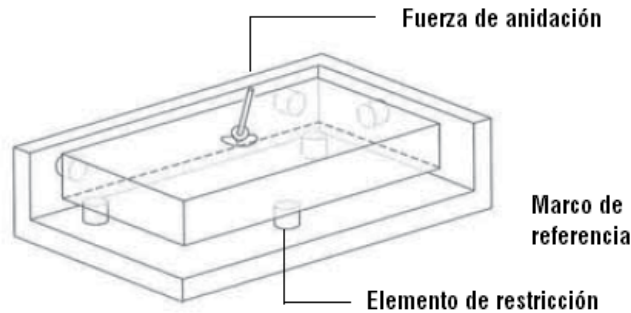


Figura 21 Conexión cinemática desmontable 3,2,1 elementos de restricción.
Adaptado de (Blanding, 1999).

B) Conexiones cinemáticas (*kinematic connections*)

Se trata de dos conexiones clásicas dentro de los círculos del diseño cinemático. La primera se llama **conexión Kelvin** consiste en tres esferas que se anidan con tres diferentes cavidades, una cónica para restringir tres grados de libertad, una cavidad en forma de V para restringir dos grados de libertad y un plano para restringir un grado de libertad, figura 22 (a).

La segunda conexión se llama **conexión Maxwell** consiste en tres esferas que se anidan en tres superficies en forma de V, por lo que se consiguen tres pares de restricciones, figura 22 (b).

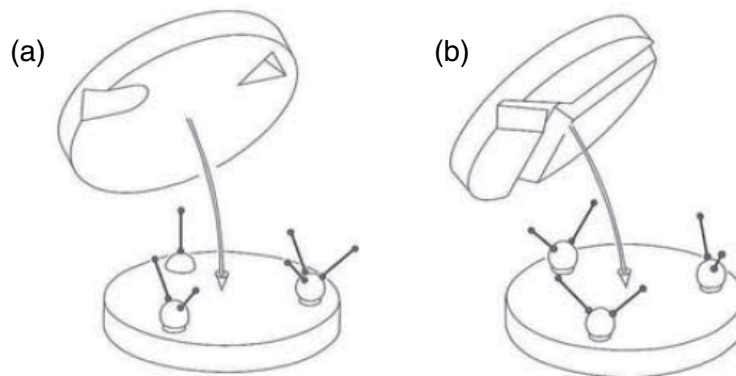


Figura 22 Conexiones desmontables de Lord Kelvin y Maxwell.
Adaptado de (Blanding, 1999).

2.2.2 B4 Estructuras

Desde la perspectiva del diseño cinemático una estructura y un mecanismo son sistemas categóricamente similares, los cuales pueden estudiarse a partir de los mismos principios de diseño. Generalmente la función de una estructura es **servir de elemento rígido** a partir del cual se montan otros elementos, para este propósito la estructura debe estar restringida contra movimiento en seis grados de libertad, figura 23.



Figura 23 Representación conceptual de una estructura.
Adaptado de (Blanding, 1999).

A primera instancia parece no haber diferencia entre una estructura y una conexión cinemática, sin embargo, para una estructura se sustituyen los elementos de restricción por elementos estructurales que le confieren rigidez en seis grados de libertad. Los elementos de una estructura suelen ser barras y placas, los cuales pueden modelarse con rigidez binaria como en el caso de los elementos de restricción flexibles¹¹ (barras delgadas, placas flexibles).

Cuando una estructura se utiliza para montar instrumentos de precisión, debe de tenerse especial cuidado en evitar la sobre restricción, ya que se podrían producir esfuerzos indeseados que distorsionen al instrumento.

Estructura de rigidez óptima

Estructura en la cual se busca que las cargas aplicadas resulten en fuerzas que generen **estados de tensión o compresión** en los elementos estructurales, figura 24 (b). El concepto inverso a este tipo de estructura es el de **estructura flexible**, en la cual las cargas provocan que los elementos estructurales generen estados de flexión, figura 24 (a).

¹¹ A pesar de que los elementos estructurales son cuerpos cuyos espesores son mayores a los de la barra delgada y la lámina flexible, Douglas Blanding trata a estos 4 elementos como elementos de rigidez binaria, debido a la magnitud de rigidez en tensión es hasta cinco órdenes de magnitud mayor a la rigidez en flexión.

Para el concepto de estructura de rigidez óptima de Douglas Blanding, la rigidez se trata como una propiedad cualitativa, una estructura rígida es extremadamente rígida en comparación con una estructura flexible.

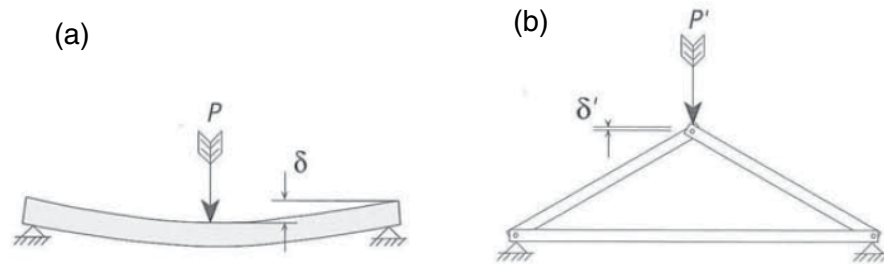


Figura 24 Representación de estructura flexible y de rigidez óptima.
Adaptado de (Blanding, 1999).

Rigidez dimensional

El concepto de rigidez estructural puede aplicarse a distintos niveles dimensionales, de tal manera que existen sistemas con rigidez en una, dos y tres dimensiones, lo cual implica estructuras que son más aptas para resistir cargas en una, dos y tres dimensiones.

El elemento más simple de rigidez es la barra ya que ofrece rigidez en una dimensión, con este elemento es posible construir estructuras como el triángulo de barras y el tetraedro de barras, que representan las estructuras rígidas más simples en 2D y 3D respectivamente.

Diseño de estructuras rígidas

Para el diseño de estructuras 2D rígidas se utiliza el modelo **suma de nodos 2D**, y para la síntesis de estructuras rígidas en 3D se utiliza el modelo **suma de nodos 3D**. Figuras 25 (a), y 25 (b) respectivamente.

Suma de nodos 2D

$$B = 2N - 3; B = \text{número de barras}, N = \text{número de nodos}$$

Suma de nodos 3D

$$B = 3N - 6; B = \text{número de barras}, N = \text{número de nodos}$$

Con estos modelos es posible obtener estructuras estáticamente determinadas, o exactamente restringidas. Para el caso de las estructuras el concepto de restricciones exactas está en función de tener el **número correcto de barras** o elementos estructurales. Cuando una estructura contiene menos barras de las necesarias, el costo que se paga es una estructura con rigidez disminuida, por el contrario, cuando una estructura tiene más

barras de las necesarias, el costo a pagar consta de aumentos en los costos de manufactura o la inclusión de esfuerzos indeseados.

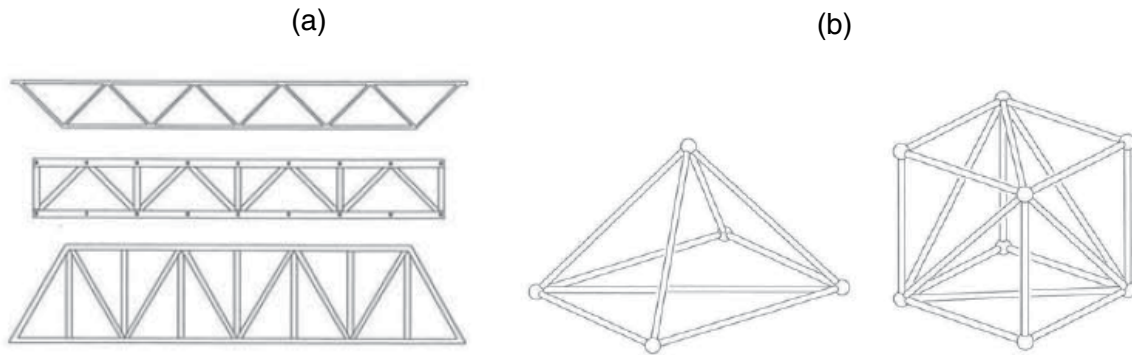


Figura 25 Estructuras de rigidez óptima en 2 y 3 dimensiones.
Adaptado de (Blanding, 1999).

2.2.2 C Principios de diseño

El diseño de máquinas y sistemas tecnológicos se reconoce como un proceso intelectual bastante complejo, uno de los paradigmas para abordar esta situación es el del diseño guiado por principios de diseño, en cuyo enfoque se tiene una base de conocimiento expresada en forma de principios con validez teórica y práctica, bajo los cuales se tiene el sustento suficiente para guiar el diseño de nuevas máquinas. Uno de los estudios más exhaustivos en esta materia es el desarrollado por Layton Carter (Hale, 1999).

Los principios de diseño utilizados en este trabajo son los siguientes: determinismo, complejidad de Glegg, y diseño de restricciones exactas.

Determinismo

El determinismo se fundamenta en la posibilidad de describir el comportamiento de sistemas y procesos a través de leyes físicas, el principio de determinismo enuncia que todo comportamiento puede ser entendido y controlado a través de leyes físicas.

*En nuestra experiencia tratando con la exactitud de las máquinas, podemos concluir que **los componentes de las máquinas son deterministas**. Esto significa que los elementos obedecen relaciones de causa y efecto y no varían al azar por ninguna razón. Lo cual implica que las causas no son esotéricas e incontrolables, y pueden explicarse en términos de **principios de ingeniería**.*

Robert R. Donaldson

Complejidad de Glegg

Gordon Glegg señala que regularmente los ingenieros están fascinados con la idea de la simplicidad, como si tuviera alguna virtud inherente en ella, seleccionan diseños simples por facilidad económica y técnica, sin embargo, todo avance por aumentar eficiencia en el campo de la ingeniería, implica una retirada de la simplicidad. Para justificar su idea ejemplifica el desarrollo de los motores de combustión interna, los cuales fueron mejorando conforme se agregaban elementos que desarrollaban funciones específicas y aumentaban la precisión (Glegg, 1972).

Si un diseño es simple, y otro complejo selecciona el diseño complejo.

Gordon L. Glegg

Diseño de restricciones exactas

El diseño de restricciones exactas puede interpretarse como un principio general que guía la naturaleza cinemática de una máquina para conseguir altos niveles de precisión y estados de movimiento determinísticos.

*El número de **restricciones** mecánicas aplicadas a un cuerpo debe ser igual a seis menos el número de grados de libertad de movimiento que se desean.*

James Clerk Maxwell (Maxwell, 2003)

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM) 3^{ra} Edición lengua española.

El vocabulario Internacional de Metrología publicado por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas BIPM, por sus siglas en francés, Bureau International des Poids et Mesures), y elaborada por el Comité Conjunto de Guías en Metrología JCGM es un diccionario de definiciones metrológicas en el cual se adopta un enfoque basado en la incertidumbre de medida, a diferencia del enfoque tradicional también llamado del valor verdadero¹².

A continuación, se presentan un conjunto de definiciones extraídas de la versión al español del Vocabulario Internacional de Metrología (Sistema Interamericano de Metrología, 2008), el cual pretende unificar el marco conceptual para el lector de este trabajo.

Magnitud, propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia¹³.

Nota

a) La referencia puede ser una unidad de medida, un procedimiento de medida, un material de referencia, o una combinación de ellos.

Medición, proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse a una magnitud.

Nota

a) Una medición supone una descripción de la **magnitud** compatible con el uso previsto de un resultado de medida, un **procedimiento de medida**, y un **sistema de medida** calibrado conforme a un procedimiento de medida especificado, incluyendo las condiciones de medida.

Mesurando, magnitud que se desea medir.

¹² El objetivo de la medición en un enfoque clásico o de valor verdadero, es obtener la mejor estimación del valor verdadero posible, la desviación a ese valor verdadero está constituida por dos tipos de errores: sistemáticos y aleatorios. En cambio, en el enfoque basado en la incertidumbre el objetivo no es determinar el mejor valor verdadero posible, se supone que la información obtenida de la medición permite únicamente atribuir al mesurando un intervalo de valores razonables, suponiendo que la medición se ha efectuado correctamente.

¹³ Esta definición es análoga a la de valor verdadero en el enfoque tradicional.

Nota

La especificación de un mesurando requiere el conocimiento de la naturaleza de la magnitud y la descripción del estado del fenómeno, cuerpo o sustancia cuya magnitud es una propiedad, incluyendo las componentes pertinentes y las entidades químicas involucradas.

Método de medida, descripción genérica de la secuencia lógica de operaciones utilizadas en una medición.

Procedimiento de medida, descripción de una medición conforme a uno o más principios de medida, un método de medida, un modelo de medida, y los cálculos necesarios para obtener un resultado de medición.

Nota

Un procedimiento de medida se documenta habitualmente con suficiente detalle para que un operador pueda realizar una medición.

Resultado de medida, conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mesurando, acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

Notas

- a) Un resultado de medida contiene generalmente información relevante sobre el conjunto de valores de una magnitud. Algunos de ellos representan al mesurando mejor que otro. Esto puede representarse como una función de densidad de probabilidad.
- b) El resultado de una medición se expresa generalmente como un valor medido único y una incertidumbre de medida.

Precisión de medida, proximidad entre los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.

Notas

- a) Es habitual que la precisión de una medida se exprese numéricamente mediante medidas de dispersión tales como la desviación típica, la varianza o el coeficiente de variación bajo las condiciones especificadas.
- b) Las condiciones especificadas pueden ser condiciones de repetibilidad, condiciones de precisión intermedia, o condiciones de reproducibilidad.

Condiciones de repetibilidad de una medición, condición de medición entro de un conjunto de condiciones que incluye al mismo procedimiento de medida, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, las mismas condiciones de operación y el

mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto o de un objeto similar en un periodo corto de tiempo.

Repetibilidad de medida, precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad

Condición de reproducibilidad de una medición, condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluyen diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares.

Reproducibilidad de medida, precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de reproducibilidad.

Incertidumbre de medida, parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mesurando a partir de la información que se utiliza.

2.3.2 Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida.

Se trata de una guía publicada por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas BIPM, por sus siglas en francés, Bureau International des Poids et Mesures), y elaborada por el Comité Conjunto de Guías en Metrología JCGM, la cual establece reglas generales para la evaluación y expresión de la incertidumbre de medida.

A partir de la versión al español de esta guía (Centro Español de Metrología, 2009), se presenta un resumen con los conceptos y definiciones pertinentes para el desarrollo de este trabajo.

Introducción

A la hora de expresar el resultado de medición de una magnitud física es obligatorio dar una indicación cuantitativa de la calidad del resultado, de tal manera que quienes utilizan dicho resultado puedan evaluar su idoneidad y comparar con otros valores. Esta justamente es la necesidad bajo la cual surgió la guía para la expresión de incertidumbre.

El concepto de incertidumbre como atributo cuantitativo es relativamente nuevo en el campo de la medición. Esta ampliamente reconocido que aun cuando se hallan identificado y corregido todas las fuentes de error, existe una incertidumbre asociada al resultado final.

Definiciones

Incertidumbre

Definición amplia: Incertidumbre de medición significa duda sobre la validez del resultado de medición.

Definición formal: Parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mesurando.

Incertidumbre típica

Incertidumbre del resultado de una medición, expresada en forma de desviación típica.

Evaluación tipo A (de incertidumbre)

Método de evaluación de la incertidumbre mediante análisis estadístico de series de observaciones.

En la mayor parte de los casos el mesurando Y no se mide directamente, sino que se determina a partir de otras magnitudes X_1, X_2, \dots, X_n por medio de una relación funcional f

Ec. 1 Modelo de medición

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Una estimación del mesurando Y , representada por y , se obtiene a partir de la ecuación 1 utilizando las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_N para los valores de N magnitudes X_1, X_2, \dots, X_N . Así, la estimación de salida y que es el resultado de la medición viene dada por

Ec. 2 Estimación del mesurando

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

La mejor **estimación** disponible de la **esperanza matemática** μ_q de una magnitud q (es decir de una variable aleatoria), de la que se han obtenido n observaciones independientes q_k en las mismas condiciones de medida, es la **media aritmética** de las n observaciones:

Ec. 3 Estimación de la esperanza matemática, a partir de la media aritmética.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

Los valores de las observaciones individuales q difieren en razón de efectos aleatorios. La **varianza experimental** de las observaciones que estiman la varianza σ^2 de la distribución de probabilidad de q , viene dada por:

Ec. 4 Estimación de la varianza de la distribución, mediante la varianza experimental

$$S^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2$$

Esta estimación de la varianza y su raíz cuadrada positiva $s(q_k)$, denominada **desviación típica experimental**, representan la variabilidad de los valores observados de q , o más específicamente su dispersión alrededor de su media \bar{q}

La mejor estimación de la varianza de la media, viene dada por

Ec. 5 Estimación de la varianza de la media, mediante la varianza experimental

$$S^2(\bar{q}) = \frac{S^2(q_k)}{n}$$

La **varianza experimental de la media** $S^2(\bar{q})$, y la **desviación típica experimental de la media** $S(\bar{q})$, igual a la raíz cuadrada positiva de $S^2(\bar{q})$, determinan la bondad con que \bar{q} estima la esperanza matemática μ_k de q , y una u otra pueden ser utilizadas como **medida de incertidumbre** de \bar{q} .

De este modo, para una magnitud de entrada X_i obtenida a partir de n observaciones repetidas e independientes $X_{i,k}$, la incertidumbre típica $u(x_i)$ de su estimación $x_i = \bar{X}_i$ es $u(x_i) = S(\bar{X}_i)$, con $S^2(\bar{X}_i)$, calculada según la ecuación 5. Por comodidad, $u^2(x_i) = S^2(\bar{X}_i)$ y $u(x_i) = S(\bar{X}_i)$ son a veces llamadas **varianza tipo A** e **incertidumbre típica tipo A**, respectivamente.

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Diseño de los colectores de fibras

En esta sección se presenta el desarrollo de los colectores de fibras que permitirán obtener los resultados experimentales. El desarrollo se presenta a partir de una estructuración basada en **ingeniería de diseño**, para lo cual se parte del planteamiento de una necesidad, se hace un análisis y planteamiento de problema y se desarrolla un diseño conceptual, el cual se desarrolla a partir de materiales y procesos de manufactura.

Los colectores a desarrollar son un colector “**convencional**” y un “**colector cinemático**”, la diferencia significativa entre ambos es la precisión con la cual pueden posicionarse respecto a la jeringa con capilar, y así llevar a cabo el proceso de electrohilado.

3.1.1 Planteamiento de la necesidad

Identificar la repercusión que tiene el aumento de precisión en el parámetro distancia capilar a colector de la técnica de electrohilado, en relación a la precisión morfológica de los materiales obtenidos con la técnica de electrohilado.

3.1.2 Análisis del problema

El parámetro distancia capilar a colector de la técnica de electrohilado hace referencia a la ubicación especial de un elemento emisor y un elemento receptor. El **elemento emisor** consiste en una jeringa plástica con capilar metálico, la cual contiene a la disolución polimérica, y es manipulada por medio de un actuador lineal (inyector), con el cual se avanza el embolo de la jeringa y se consigue un flujo volumétrico controlado. El **elemento receptor** es una lámina de aluminio sostenida de una placa vertical, sobre la cual se depositará la estructura fibrosa obtenida durante el proceso.

La realización de la técnica de electrohilado¹⁴ desde un enfoque basado en el parámetro distancia capilar a colector, implica **3 etapas**:

Preparación (emisor): El usuario prepara una disolución polimérica, la cual vierte a una jeringa plástica, para posteriormente acoplarla al inyector.

Preparación (receptor): El usuario corta una lámina delgada de aluminio¹⁵, la cual fija a un poste vertical por medio de cinta adhesiva.

Posicionamiento (emisor-receptor): El usuario introduce el capilar del elemento emisor a la cabina de trabajo por medio de un orificio. Después de esto, introduce el elemento receptor a la cabina de tal manera que alinea el centro del capilar con el centro de la lámina colectora, y aleja estos dos elementos a cierta distancia. Finalmente genera un campo eléctrico y ajusta el flujo de la disolución y el proceso de electrohilado comienza.

¹⁴ Este procedimiento se basa en la forma de trabajo del laboratorio de nanofibras del IIM UNAM

¹⁵ Espesor 0.11 mm

El usuario que ejecuta la técnica de electrohilado debe preparar el suministro y flujo controlado de disolución polimérica, así como la superficie para la deposición de fibras. **El diámetro de fibra depende de en centrar y separar a una distancia el capilar y la lámina colectora.**

Análisis cinemático sobre el parámetro distancia capilar a colector.

Se agruparon e identificaron los **cuerpos involucrados** en el parámetro distancia capilar a colector, los cuales se muestran en la figura 26. Posterior a esto, se evaluó la repercusión que podría tener cada grado de libertad de los cuerpos involucrados, si tuviera un estado de movimiento indeterminado, en relación a la precisión conseguida en el parámetro distancia capilar a colector.

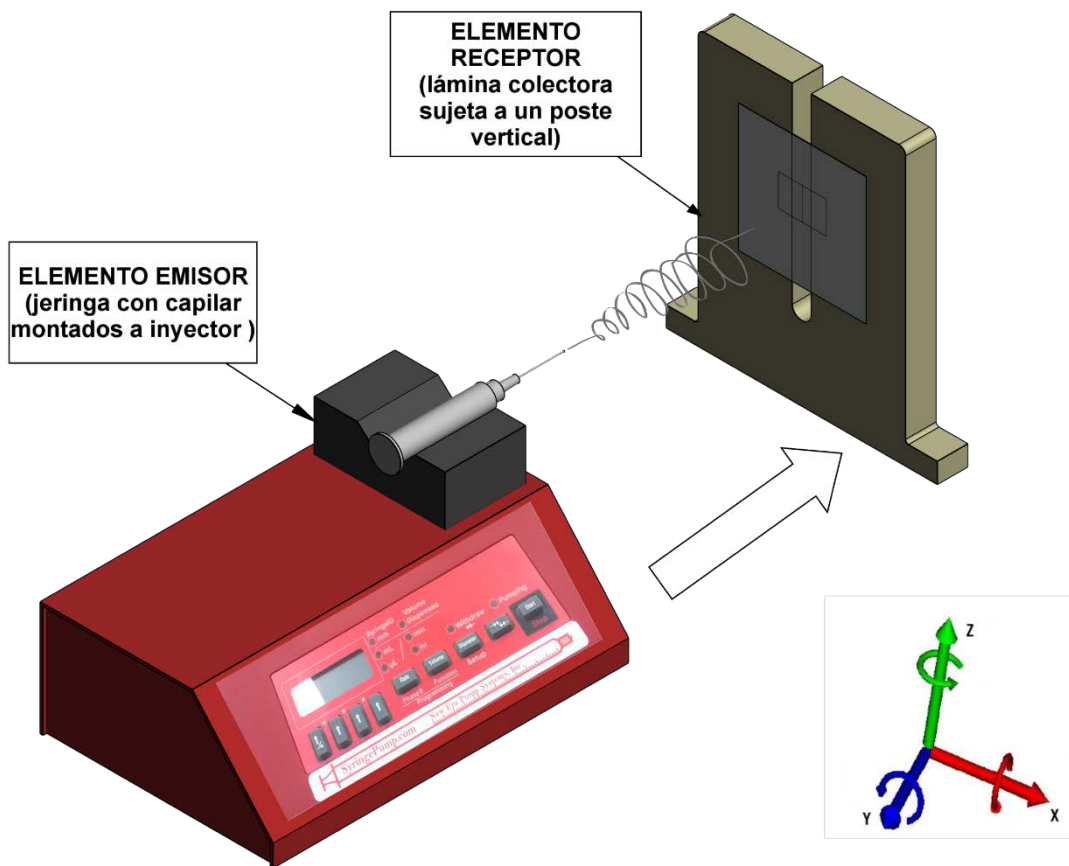


Figura 26 Elementos involucrados en el parámetro distancia capilar a colector.

En la tabla 2 se muestra la repercusión que tiene cada uno de los grados de libertad de los cuerpos que intervienen en el parámetro distancia capilar a colector. Se puede apreciar que el parámetro distancia capilar a colector es sensible en 5 grados de libertad: 3 grados de libertad lineales y 2 grados de libertad rotacionales, y es inmune al grado de libertad rotacional θY , el cual al variar no repercute de ninguna manera en la alineación y distancia entre la jeringa con capilar y la lámina recolectora de fibras.

Tabla 2 Repercusión de los grados de libertad en la precisión del parámetro distancia capilar a colector

Elemento	X	Y	Z	θX	θY	θZ
Emisor Conformado por jeringa y capilar unidos al inyector.	Alta	Alta	Alta	Alta	Nula	Alta
Receptor Conformado por lamina colectora unida a un poste.	Alta	Alta	Alta	Alta	Nula	Alta

3.1.3 Definición del problema

Diseñar un colector de fibras “**convencional**”, que representé la configuración típica utilizada en el proceso de electrohilado.

- Diseñar un poste vertical que permita sujetar una lámina colectora de fibras. El cual se posicionará respecto a capilar de forma manual.

Diseñar un colector de fibras “**cinemático**” que reinterprete al colector convencional utilizando conexiones cinemáticas.

- Diseñar una conexión cinemática desmontable para montar el elemento emisor.
- Diseñar una conexión cinemática desmontable para montar el elemento receptor.

- Unir las conexiones cinemáticas de emisor y receptor por medio de una estructura de rigidez óptima.

3.1.4 Diseño conceptual

3.1.4A Colector convencional

Descripción

El colector convencional consiste en un poste vertical donde se coloca una lámina colectora de aluminio la cual se sujeta con cinta adhesiva. En la parte trasera de la lámina se encuentra una pequeña lámina en forma de T que permite hacer contacto eléctrico con la fuente de poder por medio de conector tipo caimán, en la parte delantera de la lámina se coloca una camisa protectora que sirve para limitar el área de colección. El poste vertical se puede introducir dentro de la cabina de trabajo donde se posiciona respecto a la jeringa y capilar. El arreglo de este colector se muestra en la figura 27, los materiales y proceso de manufactura utilizados se presentan en la tabla 3.

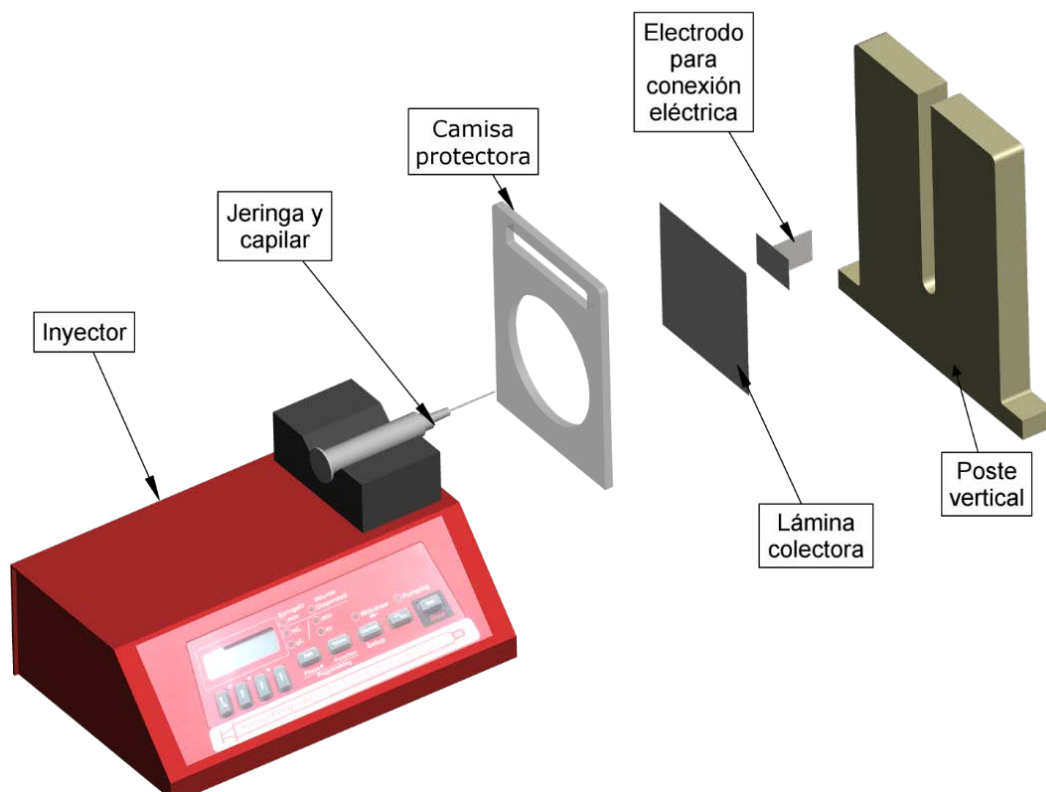


Figura 27 Detalle del colector convencional

Materiales y manufactura colector convencional

Tabla 3 Materiales y procesos de manufactura para colector convencional

Elemento	Descripción	Material	Proceso de manufactura
Poste vertical	Elemento que permite sujetar una lámina para coleccionar fibras	Polipropileno	Corte por chorro de agua
Lámina coleccionadora	Elemento donde se depositan las fibras obtenidas por electrohilado	Aluminio	Manual
Contacto eléctrico	Elemento que permite conectar la lámina coleccionadora a la fuente de voltaje	Aluminio	Manual
Camisa protectora	Elemento que limita el área de colección	Acrílico	Corte láser

3.1.4B Colector cinemático

Conexión cinemática desmontable (elemento emisor)

Descripción

Para el montaje y alineación del elemento emisor se planteó una conexión cinemática desmontable entre el inyector y un marco de referencia basada en un arreglo de 6 elementos de restricción ubicados en 3 planos diferentes.

Cada elemento de restricción se basa en un cuerpo de aluminio con una cavidad esférica, donde se introducen esferas que permiten contacto puntual. Como fuerza de anidación se utilizan imanes de neodimio y el propio peso del inyector. El diagrama de esta conexión se muestra en la figura 28, los materiales y proceso de manufactura utilizados se presentan en la tabla 4.

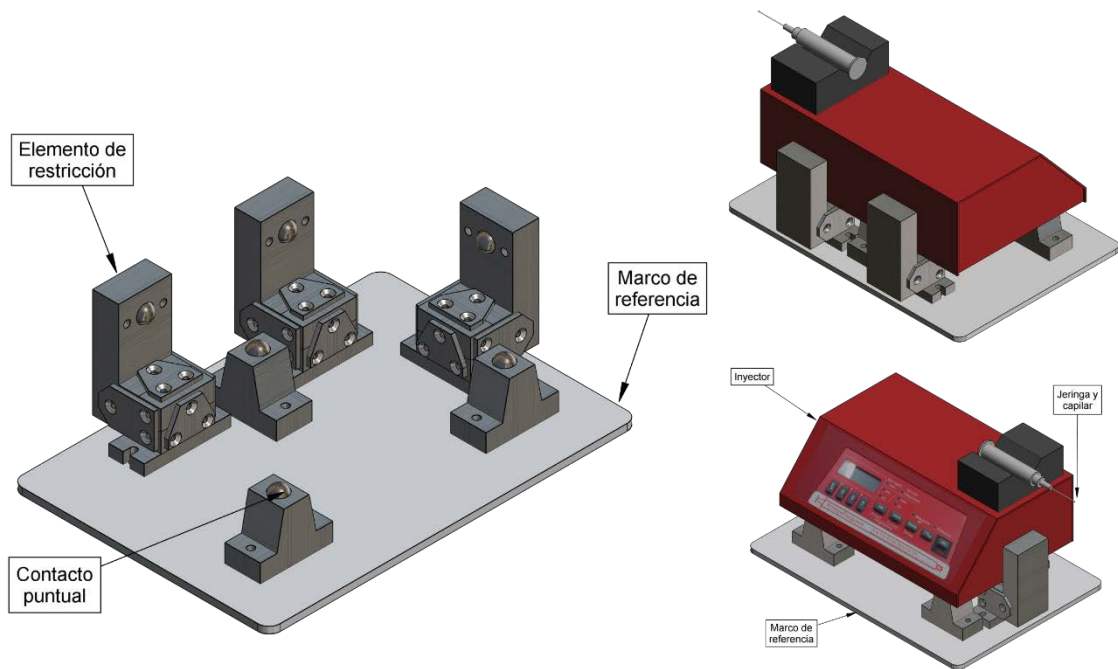


Figura 28 Conexión cinemática desmontable para inyector

Materiales y manufactura

Tabla 4 Materiales y procesos de manufactura para la conexión cinemática desmontable del elemento emisor

Elemento	Descripción	Material	Proceso de manufactura
Elementos de restricción	Permiten un contacto puntual, para establecer la conexión cinemática	Cuerpo de aluminio aleación 6061, con esferas incrustadas de acero inoxidable aleación 440C y esfericidad de 0.00001	Maquinado por control numérico
Marco de referencia	Elemento que sirve para establecer la conexión cinemática desmontable	Aluminio aleación 6061	Corte por chorro de agua

3.1.4 Conexión cinemática desmontable (elemento receptor)

Descripción

La lámina colectora de fibras al ser una lámina de aluminio delgada tiende a deformarse fácilmente, por tal motivo se hizo proteger con una camisa plástica que consiste en dos piezas que la cubren por delante y detrás. Esta camisa protectora se supone como un cuerpo en dos dimensiones, la cual se consigue posicionar y alinear a un poste vertical por medio de una conexión cinemática (2C,1R), como fuerza de anidamiento se utiliza la terminación en forma de flecha de la camisa protectora la cual está diseñada para sostenerse con cinta adhesiva.

Entre este poste vertical y una placa que sirve de marco de referencia se establece una conexión cinemática desmontable de tipo (6C,0R) basada en un patrón de 3,2,1 de elementos de restricción. Los elementos de restricción son esferas, y la fuerza de anidación se basa en imanes de neodimio.

La conexión eléctrica de la lámina colectora, se consigue mediante un eje incrustado en la parte trasera de la camisa protectora, en dicho eje se atornilla un borne eléctrico que permitirá hacer conexión con un conector tipo banana.

Para conseguir la distancia del parámetro distancia capilar a colector, la placa que sirve de marco de referencia se atornilla a la distancia deseada, y el poste que contiene a la camisa protectora y a la lámina colectora de fibras, puede montarse y desmontarse con alta precisión. El diagrama de esta conexión se muestra en la figura 29, los materiales y proceso de manufactura se presentan en la tabla 5.

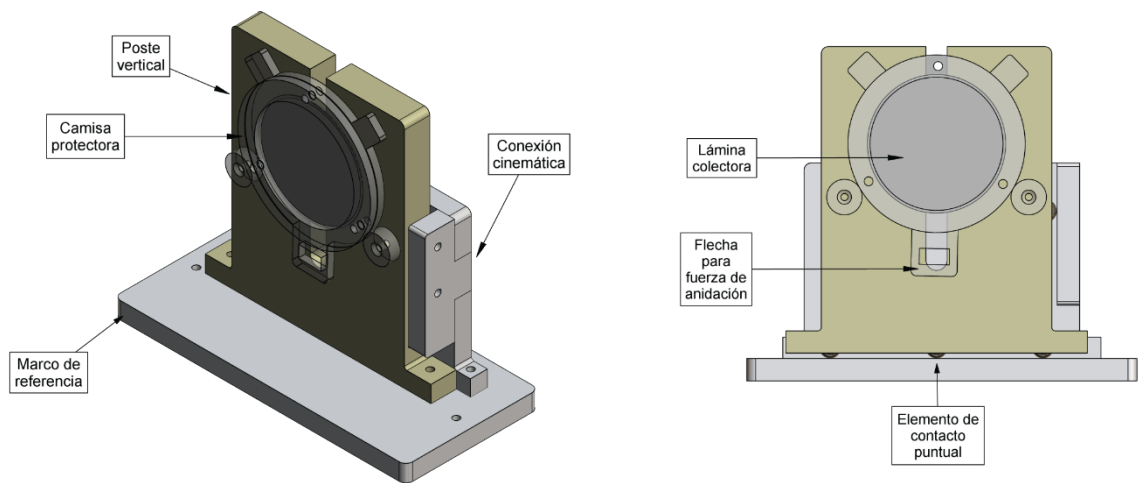


Figura 29 Conexión cinemática desmontable para colector de fibras cinemático

Materiales y manufactura

Tabla 5 Materiales y procesos de manufactura para la conexión cinemática desmontable del elemento receptor

Elemento	Descripción	Material	Proceso de manufactura
Lámina colectora de fibras	Material donde se colecta la estructura fibrosa obtenida durante el proceso de electrohilado	Aluminio	Cortador manual
Camisa protectora	Elemento que protege a la lámina colectora, evita que esta se maltrate, y permite la conexión eléctrica con la fuente de voltaje	Acrílico	Corte láser
Poste vertical	Elemento manipulable por el usuario, que puede entrar y salir del sistema conservando su posición y alineación.	Polipropileno	Corte por chorro de agua, maquinado por control numérico.
Marco de referencia	Elemento que sirve para establecer la conexión cinemática desmontable	Aluminio aleación 6061	Corte por chorro de agua
Elementos de restricción	Permiten un contacto puntual, para establecer la conexión cinemática	Acero inoxidable aleación 440C, esfericidad 0.00001	Comprados a la empresa Ball-Tec

3.1.4 Estructura rígida

Descripción

Debido a que el proceso de electrohilado se lleva a cabo dentro de una cabina cerrada, este elemento se aprovechó como una estructura de rigidez óptima 3D (six sided box, según la teoría de diseño cinemático de Douglas Blanding), a partir de la cual se realizan conexiones mecánicas.

Para tal motivo se agregaron dos placas de aluminio unidas a la cabina de electrohilado, las cuales se extienden de tal manera que permiten el montaje y alineación de las conexiones cinemáticas para el elemento emisor y receptor. El diagrama de estos elementos estructurales se muestra en la figura 30, los materiales y procesos de manufactura se presenta en la tabla 6.

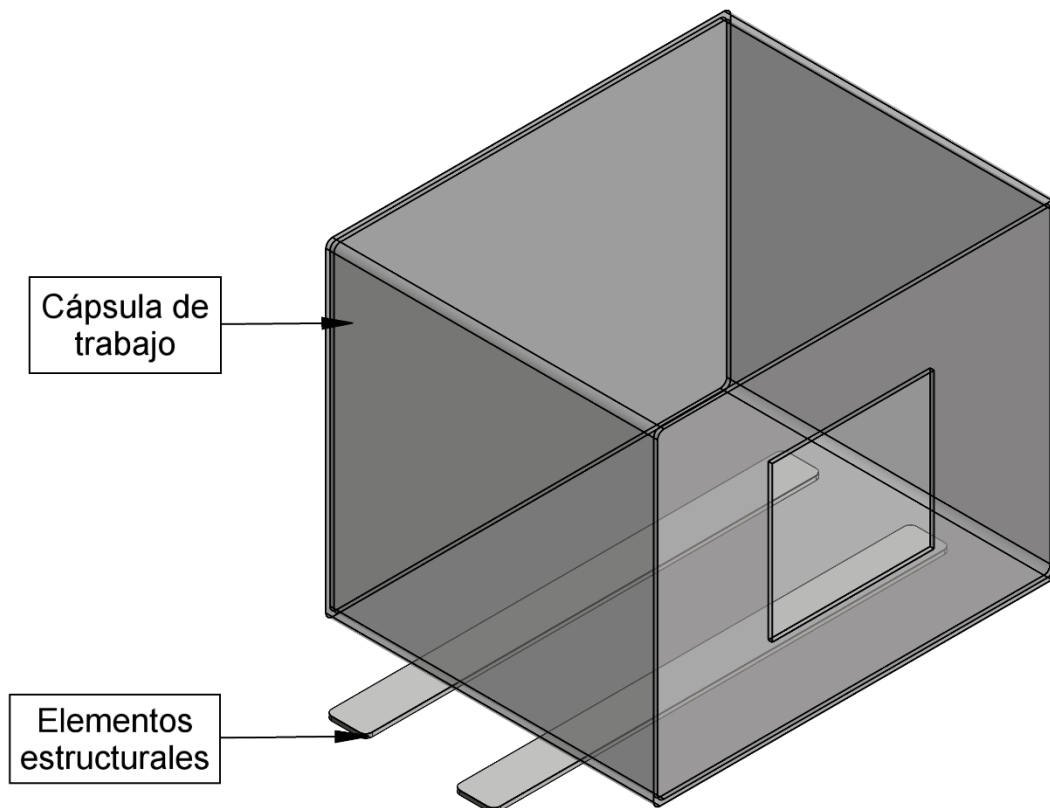


Figura 30 Estructura rígida para montar conexiones cinemáticas de inyector y colector.

Materiales y manufactura

Tabla 6 Materiales y procesos de manufactura para la estructura que soporta las conexiones cinemáticas desmontables

Elemento	Descripción	Material	Proceso de manufactura
Cabina de electrohilado	Espacio dentro del cual se lleva a cabo el proceso de electrohilado	Acrílico	No aplica
Placas de aluminio	Elementos estructurales que sirven para montar las conexión cinemáticas desmontables	Aluminio aleación 6061	Corte por chorro de agua

Finalmente, el colector “cinemático” formado por las conexiones cinemáticas desmontables para el emisor, el receptor y los elementos estructurales se muestran en la figura 31.

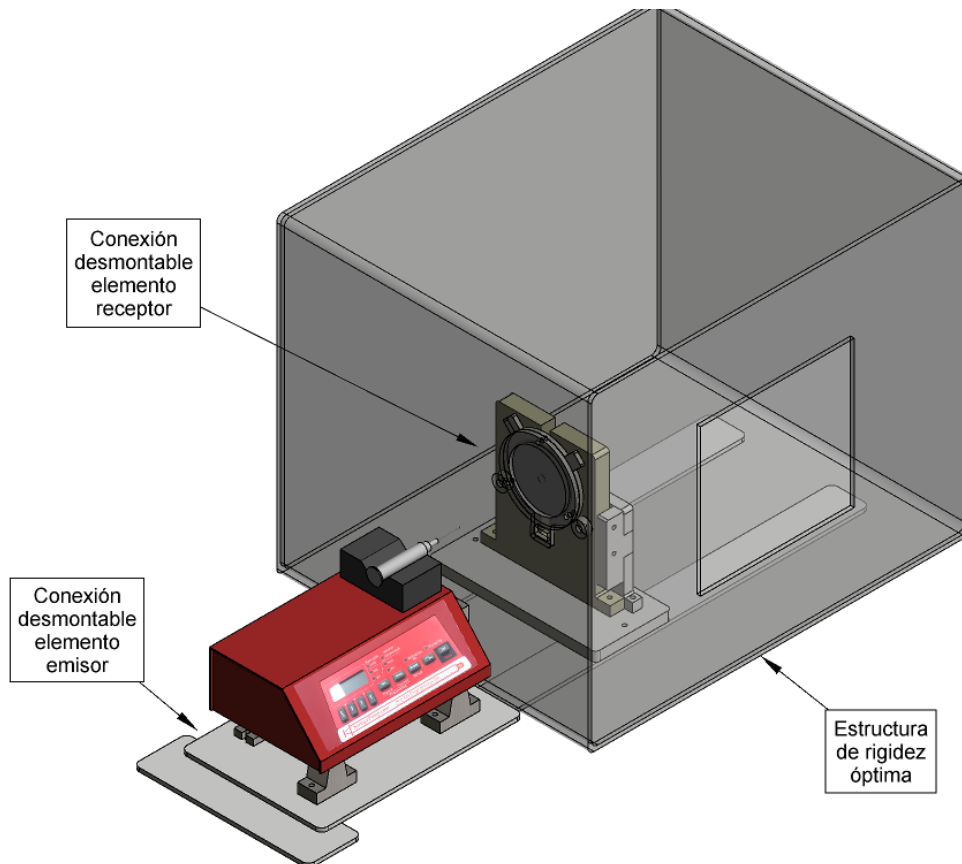


Figura 31 Rediseño de la técnica de electrohilado, con conexiones cinemáticas.

3.2 Fabricación de las estructuras por electrohilado

3.2.1 Obtención de la disolución polimérica

Materiales

Polímero, gránulos de Poli(ácido láctico) PLA de la empresa NatureWorks. Con peso molecular promedio $M_w = 192'610 \frac{g}{mol}$.

Disolvente, 2,2,2-Trifluoroetanol de la marca Sigma-Aldrich.

Procedimiento

Se prepararon 10 ml de disolución polimérica, compuesta por Poli(ácido láctico) y 2,2,2-Trifluoroetanol a una concentración de 13% masa/volumen. Para esto fue necesario pesar 1.3 gr de gránulos de polímero con una balanza OHAUS Pioneer modelo PA313, posteriormente estos gránulos se vaciaron en un matraz aforado Pyrex Clase A con capacidad de 10 ml, y se agregó el disolvente hasta llegar a la marca del aforo. Finalmente, el matraz se colocó en un agitador magnético por un tiempo de 24 horas.

3.2.2 Proceso de electrohilado

Materiales

Laboratorio, la obtención de membranas se llevó a cabo dentro del laboratorio de nanofibras del Instituto de Investigaciones en Materiales.

Equipo, el proceso de electrohilado se llevó a cabo dentro de una cabina de acrílico, la diferencia de potencial eléctrico se controló con una fuente de voltaje marca **Glassman**, el flujo de disolución se controló con un inyector marca **Syringe Pump**, y se utilizó un colector de fibras “convencional” y uno “cinemático” diseñados específicamente para los fines de esta investigación.

Procedimiento

Organización de muestras, se obtuvieron 2 conjuntos de materiales a través de la técnica de electrohilado, el primer conjunto formado por las muestras M_1, M_2, \dots, M_{10} se obtuvo utilizando un colector de fibras “convencional”, y el segundo conjunto formado por las muestras $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{20}$ utilizando un colector de fibras “cinemático”. La organización de estos conjuntos de muestras se observan en el diagrama solar de la figura 32.

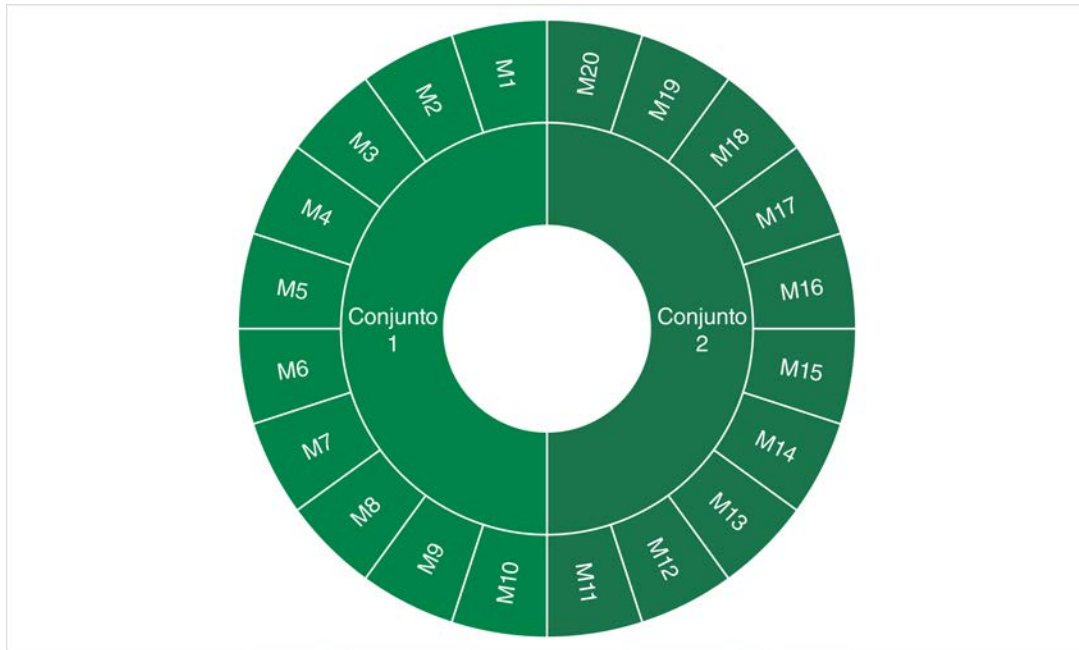


Figura 32 Organización de la muestras obtenidas por la técnica de electrohilado.

Parámetros experimentales, Cada conjunto de muestras se obtuvo de forma continua bajo las siguientes condiciones: misma disolución polimérica, mismas condiciones de electrohilado, mismo operador, pero **diferente colector de fibras**.

Los parámetros de electrohilado utilizados se retomaron de los reportados en investigaciones previas desarrolladas en el laboratorio de nanofibras del IIM para disoluciones poliméricas a base de Poli (ácido láctico) y 2,2,2-Trifluoroetanol (Gómez Pachón , 2013) (Ospina Orejarena, 2011) (Navarro Cerón, 214) (Muñoz Ramírez, 2014), los cuales se detallan en la tabla 7.

Tabla 7 Parámetros experimentales para la técnica de electrohilado

Parámetro	Valor
Disolución polimérica	Poli(ácido láctico) en 2,2,2 -Trifluoroetanol
Concentración	13% masa/volumen
Diferencia de potencial	10'000 Volts DC
Flujo volumétrico	0.4 ml/hr
Diámetro de capilar	0.7 mm
Longitud de capilar	25 mm
Volumen dispensado por muestra	0.2 ml
Duración de proceso por muestra	30 min
Jeringa	Modelo HSW 6 ml
Distancia capilar a colector	10 cm
Dimensiones de lámina colectora	Circulo diámetro 7.5 cm, área 44.17 cm ²
Material de lámina colectora	Aluminio
Espesor de lámina colectora	0.11 mm
Temperatura durante el proceso	35°C
Humedad relativa durante el proceso	20 %
Dimensione de cabina de trabajo	(50.5,40.5,40.5 [cm]) (largo, alto, ancho)
Material de cabina de trabajo	Polimetilmetacrilato PMMA

Procedimiento, los pasos seguidos para la obtención de las muestras M_1, M_2, \dots, M_{10} y $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{20}$ se describen en las tablas 8 y 9 respectivamente. Cabe señalar que previo a la obtención de cada uno de estos conjuntos de muestras, se acondicionó el ambiente dentro de la cabina de electrohilado en cuanto a humedad y temperatura. Para mantener la humedad se utilizaron 2 Kg de desecante sólido marca *Drierite* regenerado previo a su utilización en un horno a una temperatura de 200 °C por un tiempo de 8 horas, el cual se esparció en el suelo de la cabina y se mantuvo durante el proceso. Para mantener la temperatura se utilizó un calefactor mantenido a 35°C.

Tabla 8 Procedimiento para obtener muestras con el colector “convencional”


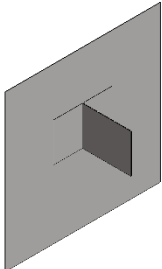
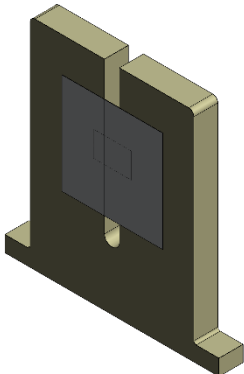
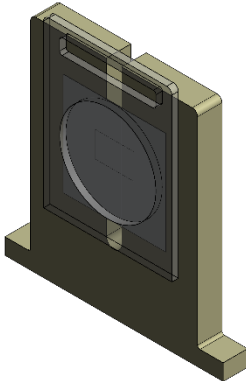
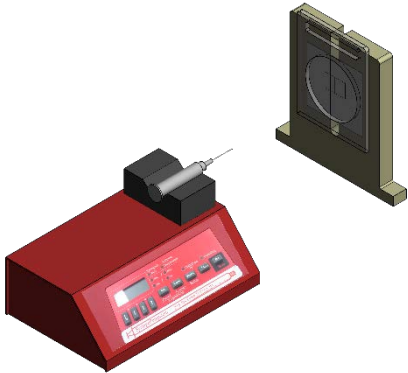
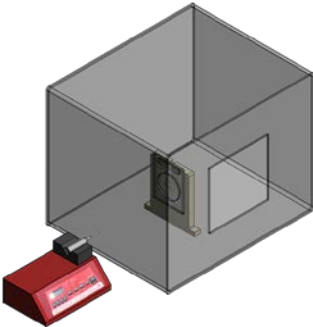

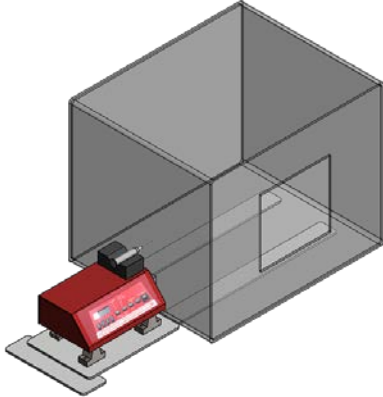
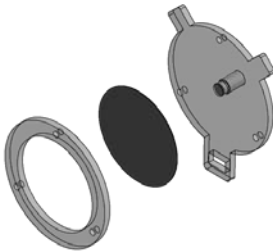
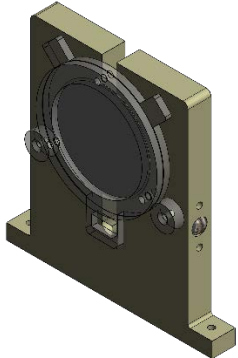
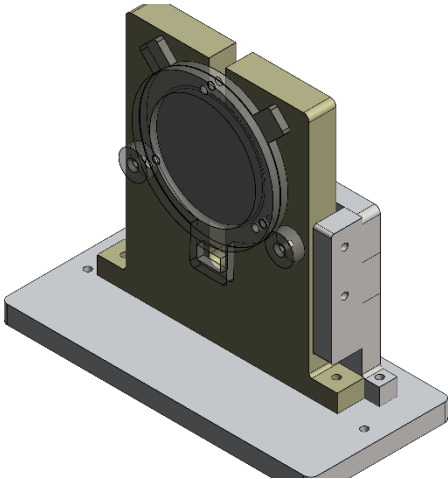
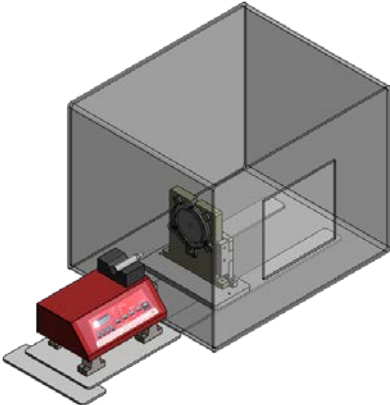
Procedimiento	
<p>1. Acoplar jeringa con disolución a inyector</p> 	<p>2. Preparar lámina colectora y electrodo de conexión eléctrica</p> 
<p>3. Posicionar y pegar lámina colectora a poste vertical</p> 	<p>4. Posicionar y pegar camisa protectora a poste vertical</p> 
<p>5. Posicionar colector respecto a inyector</p> 	<p>6. Encender inyector y fuente de voltaje</p> 

Tabla 9 Procedimiento para obtener muestras con un colector “cinemático”

Procedimiento	
<p>1. Acoplar jeringa con disolución a inyector</p> 	<p>2. Montar inyector a conexión desmontable</p> 
<p>3. Colocar lámina colectora de fibras dentro de la camisa protectora</p> 	<p>4. Montar camisa colectora a poste vertical</p> 
<p>5. Montar poste vertical a conexión desmontable</p> 	<p>6. Encender inyector y fuente de voltaje</p> 

Las operaciones de **posicionamiento** descritas en los pasos 3,4 y 5 del procedimiento para obtener las muestras M_1, M_2, \dots, M_{10} implica realizar mediciones manuales para conseguir la alineación y separación de objetos. Sin embargo el procedimiento para obtener las muestras $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{20}$ solo implica operaciones de **montaje** las cuales debido al diseño del “colector cinemático” no requieren de mediciones manuales por parte de usuario, ya que está basado en mecanismos de auto alineación.

3.3 Caracterización morfológica

3.3.1 Medición de área de material depositado

Descripción del mesurando

Sea $A_{Con}[mm^2]$, el área del cúmulo de fibras depositado al realizar el proceso de electrohilado sobre un colector de fibras “convencional”.

Sea $A_{Cin}[mm^2]$, el área del cúmulo de fibras depositado al realizar el proceso de electrohilado sobre un colector de fibras “cinemático”.

Principio de medida

Procesamiento de imágenes vectoriales.

Procedimiento de medida:

Preparación de muestras, a partir de los dos conjuntos de muestras fabricadas por la técnica de electrohilado, donde el primer conjunto M_1, M_2, \dots, M_{10} se obtuvo utilizando un colector de fibras “convencional” y el segundo conjunto $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{20}$ utilizando un colector de fibras “cinemático”, se procedió a colocar cada una de estas muestras sobre una superficie plana adicionada con una regla plástica de resolución 1 mm, y un soporte universal acoplado con una cámara digital de 8 mega pixeles, con lo cual se obtuvieron fotografías digitales para cada muestra.

Método de medida, cada una de las fotografías digitales correspondientes a las muestras M_1, M_2, \dots, M_{20} se procesó en el software de dibujo vectorial Adobe Illustrator CC, donde se calculó el perímetro de la mancha de material depositado, y una línea de longitud 10 mm observadas de la muestra y de la regla plástica respectivamente. Posteriormente esta información se exportó en escala 1:1 al software de dibujo asistido por computadora Autodesk *Autocad* versión 2016 donde se obtuvo un conjunto de datos de área A_1, A_2, \dots, A_{20} , correspondientes a los perímetros calculados.

Resultado de medida, del conjunto de 20 resultados de área A_1, A_2, \dots, A_{20} asociados a las muestras M_1, M_2, \dots, M_{20} , se omitieron los resultados A_1 y A_{11} los cuales representan datos de la primera muestra obtenida con cada tipo de colector.

Los valores estimados para el área de material depositado sobre los colectores “convencional” y “cinemático” se calcularon a partir del promedio aritmético de las mediciones de área A_i , como se muestran en las Ecuaciones 3,4 respectivamente. Adicionalmente, a estos estimados se les agregó un valor de incertidumbre de medición tipo a, Ecuaciones 5,6 donde se utilizó el estimador de la desviación típica S_{N-1} , el cual se muestra en la Ecuación 7.

$$A_{Con} = \frac{1}{9} \sum_{i=2}^{10} A_i \quad (3)$$

$$A_{Cin} = \frac{1}{9} \sum_{i=12}^{20} A_i \quad (4)$$

$$U(A_{Con}) = \frac{S_{N-1}(A_2, A_3, \dots, A_{10})}{\sqrt{9}} \quad (5)$$

$$U(A_{Cin}) = \frac{S_{N-1}(A_{12}, A_{13}, \dots, A_{20})}{\sqrt{9}} \quad (6)$$

$$s_{N-1} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q})^2} \quad (7)$$

donde:

N , número de datos

\bar{q} , promedio aritmético del conjunto de datos q_i

3.3.2 Medición de circularidad de material depositado

Descripción del mesurando

Sea $C_{Con} \left[\frac{mm^2}{mm^2} \right]$, la circularidad del cúmulo de fibras depositado al realizar el proceso de electrohilado sobre un colector de fibras “convencional”.

Sea $C_{Con} \left[\frac{mm^2}{mm^2} \right]$, la circularidad del cúmulo de fibras depositado al realizar el proceso de electrohilado sobre un colector de fibras “cinemático”.

Principio de medida

Procesamiento de imágenes vectoriales

Procedimiento de medida:

Preparación de muestras, la información utilizada para las mediciones se basó en las mismas fotografías utilizadas anteriormente para la medición de área del cúmulo depositado, las cuales corresponden a las muestras M_2, M_3, \dots, M_{10} obtenidas con un colector “convencional” y $M_{12}, M_{13}, \dots, M_{20}$ obtenidas con un colector “cinemático”.

Método de medida, cada una de las fotografías digitales se procesó en el software de dibujo vectorial Adobe Illustrator CC donde se calcó el perímetro de la mancha de material depositado y una línea de longitud de 10 mm, observadas de la muestra y de la regla plástica respectivamente. Esta información se exportó en escala 1:1 al software de dibujo asistido por computadora *Autocad* versión 2016 donde utilizando el comando “*massprop*” se obtuvieron las coordenadas del centroide de cada uno de los perímetros, las cuales se utilizaron posteriormente como centros para dibujar círculos que contuviera a los perímetros. Finalmente se obtuvieron mediciones del área de los círculos $AC_2, AC_3, \dots, AC_{10}$ y $AC_{12}, AC_{13}, \dots, AC_{20}$, correspondientes a las muestras M_2, M_3, \dots, M_{10} y $M_{12}, M_{13}, \dots, M_{20}$.

Resultado de medida, los valores estimados para la circularidad del cúmulo depositado sobre los colectores “convencional” y “cinemático”, se calcularon como el promedio aritmético del cociente de las mediciones AC_i sobre A_i , como se muestra en las Ecuaciones 8,9 respectivamente. Adicionalmente, a estos valores estimados se les agregó un valor de incertidumbre de medición tipo a, para lo cual se utilizó el estimador S_{N-1} para la desviación típica, lo cual se muestra en las Ecuaciones 10-11 y 7.

$$C_{Con} = \frac{1}{9} \sum_{i=2}^{10} \frac{AC_i}{A_i} \quad (8)$$

$$C_{Cin} = \frac{1}{9} \sum_{i=12}^{20} \frac{AC_i}{A_i} \quad (9)$$

$$U(C_{Con}) = \frac{S_{N-1} \left(\frac{AC_2}{A_2}, \frac{AC_3}{A_3}, \dots, \frac{AC_{10}}{A_{10}} \right)}{\sqrt{9}} \quad (10)$$

$$U(C_{Cin}) = \frac{S_{N-1} \left(\frac{AC_{12}}{A_{12}}, \frac{AC_{13}}{A_{13}}, \dots, \frac{AC_{20}}{A_{20}} \right)}{\sqrt{9}} \quad (11)$$

3.3.3 Medición de diámetro de fibra

Descripción del mesurando

Sea $D_{Con}[\mu m]$, el diámetro de fibra de la estructura obtenida al realizar el proceso de electrohilado sobre un colector de fibras “convencional”.

Sea $D_{Cin}[\mu m]$, el diámetro de fibra de la estructura obtenida al realizar el proceso de electrohilado sobre un colector de fibras “cinemático”.

Principio de medida

Procesamiento de imágenes vectoriales

Preparación de muestras, La información utilizada para las mediciones fue un conjunto de micrografías correspondientes a las muestras M_1, M_2, \dots, M_{10} obtenidas con un colector “convencional” y $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{20}$ obtenidas con un colector “cinemático”. Para obtener las micrografías se recortó un área aproximada de 5 x 5 [mm] de cada una de las muestras y se colocaron sobre portamuestras cilíndricos de aluminio, posteriormente se realizó un recubrimiento con oro en un equipo JEOL JPC-1100, y finalmente se obtuvieron micrografías a 5000 aumentos en un microscopio JEOL Field Emission JSM-7600F.

Método de medida, cada una de las micrografías correspondientes a las muestras M_1, M_2, \dots, M_{20} se importó en el software de procesamiento de imágenes *Image J*, donde se estableció una escala de 52 pixeles por micra, se seleccionaron 5 fibras de planos superiores y se realizaron 50 mediciones de diámetro de fibra q_i con cuatro cifras significativas a lo largo de cada fibra. De tal manera que se obtuvieron 250 mediciones de diámetro de fibra para cada muestra, y un total de 5'000 mediciones.

Resultado de medida, a partir de las 250 mediciones de diámetro de fibra q_i obtenidas para cada muestra, se calcularon los diámetros promedio $\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_{10}$ y $\bar{D}_{11}, \bar{D}_{12}, \dots, \bar{D}_{20}$, Ecuación 12. Los valores estimados para el diámetro de fibra obtenido con los colectores “convencional” y “cinemático”, se calcularon como el promedio aritmético de los diámetros promedio \bar{D}_i , como se muestra en las Ecuaciones 12,13. Adicionalmente, a estos valores estimados se les agregó un valor de incertidumbre de medición tipo a, para lo cual se utilizó el estimador S_{N-1} para la desviación típica, lo cual se muestra en las Ecuaciones 10-11 y 7.

$$\bar{D}_n = \frac{1}{250} \sum_{i=1}^{250} q_i \quad (12)$$

para $n = 1, 2, \dots, 10$

$$D_{Con} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \bar{D}_n \quad (13)$$

$$D_{Cin} = \frac{1}{10} \sum_{n=11}^{20} \bar{D}_n \quad (14)$$

$$U(D_{Con}) = \frac{s_{N-1}(\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_{10})}{\sqrt{10}} \quad (15)$$

$$U(D_{Cin}) = \frac{s_{N-1}(\bar{D}_{11}, \bar{D}_{12}, \dots, \bar{D}_{20})}{\sqrt{10}} \quad (16)$$

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Diseño de colectores

El estudio experimental sobre la relación que existe entre la precisión morfológica de las fibras obtenidas por la técnica de electrohilado y la precisión con la que se posiciona inyector y colector se llevó a cabo a partir del diseño e implementación de dos colectores de fibras denominados “convencional” y “cinemático”.

La manufactura del colector de fibras “**convencional**” se basó en el diseño mostrado en la sección 3.1 de este trabajo. Este colector representa la naturaleza mecánica y estructural de un colector de fibras tradicional, así como la forma en la cual el usuario posiciona el colector por medio de mediciones de longitud que conllevan un posicionamiento de baja precisión. El resultado final de este colector se muestra en la figura 33.

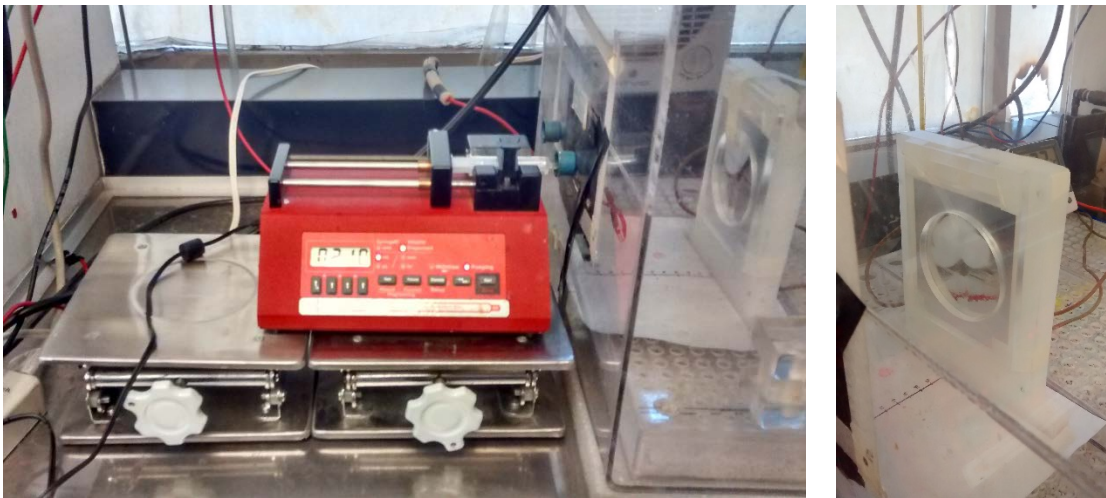


Figura 33 Colector de fibras "convencional".

La manufactura del colector de fibras “**cinemático**” se basó en el diseño mostrado en la sección 3.1 de este trabajo. Este colector es una reinterpretación de la naturaleza mecánica y estructural del colector de fibras “convencional”, a través de principios de diseño cinemático, permite que el usuario posicione el colector por medio de sistemas de auto alineación, que conllevan mayor precisión en el posicionamiento. El resultado final de este colector se muestra en la figura 34 y 35.

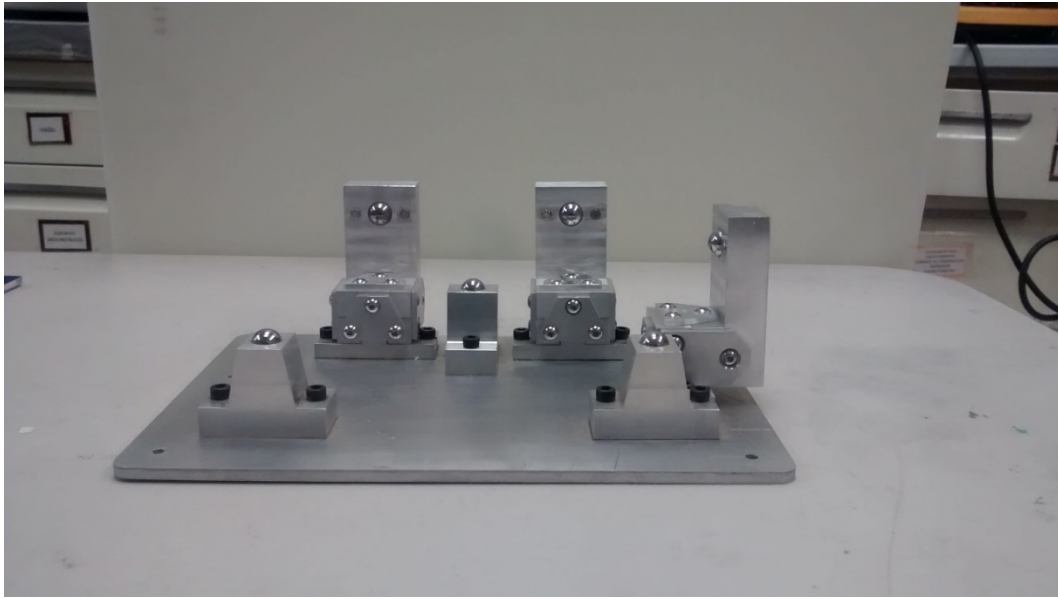


Figura 34 Conexión cinemática desmontable para inyector.

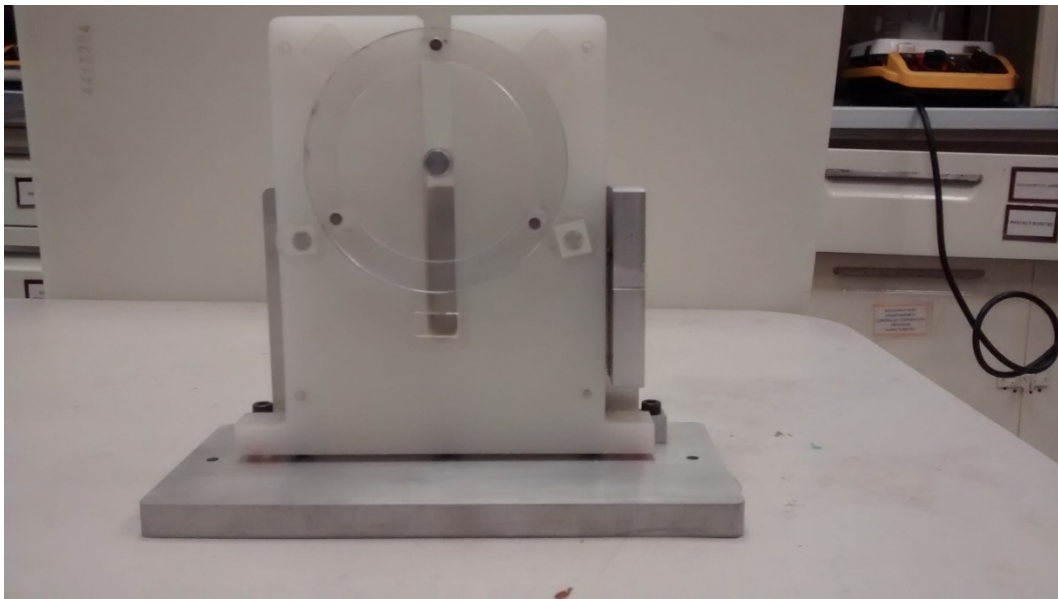
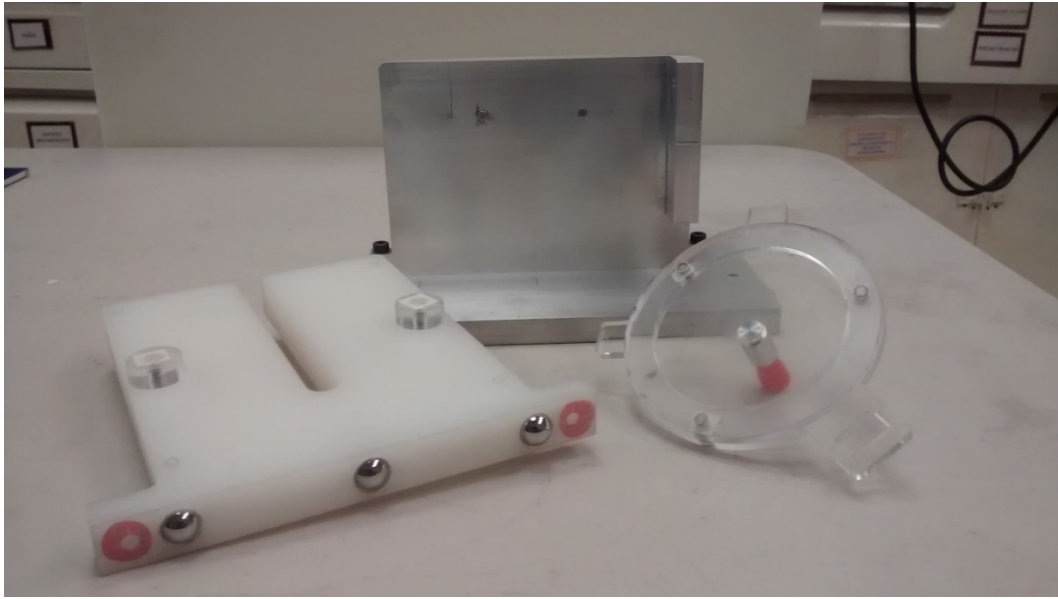


Figura 35 Conexión cinemática desmontable para colector de fibras.

4.2 Estructuras electrohiladas

Se obtuvieron 2 conjuntos de membranas electrohiladas ($M1, M2, \dots, M10$) y ($M11, M12, \dots, M20$). Cada conjunto se obtuvo de acuerdo a la metodología expuesta en la sección 3.2, donde la única diferencia entre ambos conjuntos es el tipo de colector de fibras utilizado, las muestras del conjunto 1 se obtuvieron utilizando un colector de fibras “convencional”, mientras que las muestras del conjunto 2 se obtuvieron utilizando un colector de fibras “cinemático”.

Las membranas electrohiladas obtenidas mediante los colectores “convencional” y “cinemático”, se muestra en la figura 36 y 37 respectivamente. Donde se aprecia la deposición de material en cúmulos de tamaño similar con geometría que tiende a la formación de círculos.



Figura 36 Membranas electrohiladas con un colector "convencional".
(Obtenidas mediante fotografías digitales).

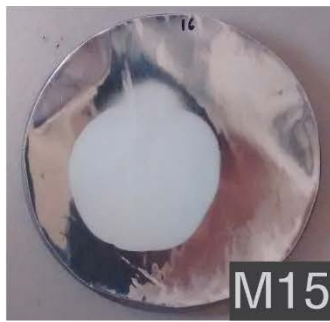
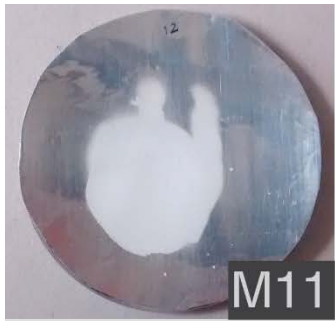


Figura 37 Muestras obtenidas con un colector "cinemático"
(Obtenidas mediante fotografías digitales).

4.3 Caracterización morfológica

4.3.1 Medición de área de material depositado

La medición de las área de material A_{Con} y A_{Cin} depositadas sobre los colectores “convencional” y “cinemático”, se realizó de acuerdo a la definiciones del mesurando, el principio y el procedimiento de medida descritos en la sección 3.3.1.

Los resultados de medición A_i del área del cúmulo de fibras depositado sobre los colectores “convencional” y “cinemático” para cada una de las membranas electrohiladas se presentan en la tabla .

Tabla 10 Resultados de medición de área de material depositado

Colector “convencional”		Colector “cinemático”	
Muestra M_i	Área $A_i[mm^2]$	Muestra M_i	Área $A_i[mm^2]$
M_2	1846.81	M_{12}	2203.85
M_3	1866.81	M_{13}	2026.12
M_4	1726.86	M_{14}	2338.92
M_5	2425.78	M_{15}	2132.83
M_6	1905.08	M_{16}	2041.38
M_7	2031.57	M_{17}	2353.40
M_8	1708.22	M_{18}	1935.71
M_9	1781.40	M_{19}	1790.13
M_{10}	1701.85	M_{20}	1923.20

Los valores estimados para el área de material depositado sobre un colector “convencional” A_{Con} , así como el área de material depositado sobre un “colector cinemático” A_{Cin} , **se obtuvo a partir del promedio aritmético de los resultados M_i** , a los cuales se agregó un valor de incertidumbre de medición tipo A. Estos resultados se presentan en la tabla 11.

Tabla 11 Valores estimados para el área de material depositado

Colector “convencional”		Colector “cinemático”	
A_{Con}	1'888.26 [mm ²]	A_{Cin}	2'082.84 [mm ²]
$u(A_{Con})$	76.06 [mm ²]	$u(A_{Cin})$	63.86 [mm ²]

4.3.2 Medición de circularidad del cúmulo de material depositado

Las mediciones de los cúmulos de material C_{Con} y C_{Cin} depositados sobre los colectores “convencional” y “cinemático” se realizaron de acuerdo a las definiciones del mesurando, el principio y el procedimiento de medida descritos en la sección 3.3.2, donde se definió la circularidad de cúmulo de la siguiente manera.

Circularidad de cúmulo

$$C_i = \frac{AC_i}{A_i}$$

donde:

A_i , es el área encerrada por el perímetro del cúmulo depositado en el colector de fibras.

AC_i , es el área de un círculo cuyo centro se encuentra en el centroide del perímetro del cúmulo de fibras, y el cual contiene al perímetro del cúmulo.

La circularidad del cúmulo de fibras depositado sobre los colectores “convencional” y “cinemático” se presenta en las imágenes 39 y 40.

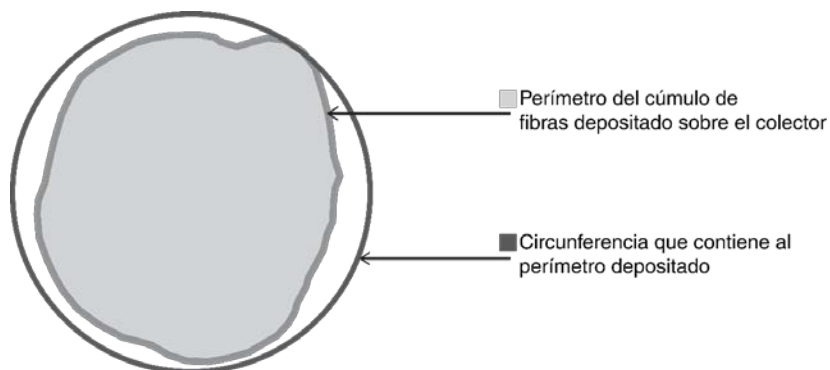


Figura 38 Concepto de medición de circularidad propuesto

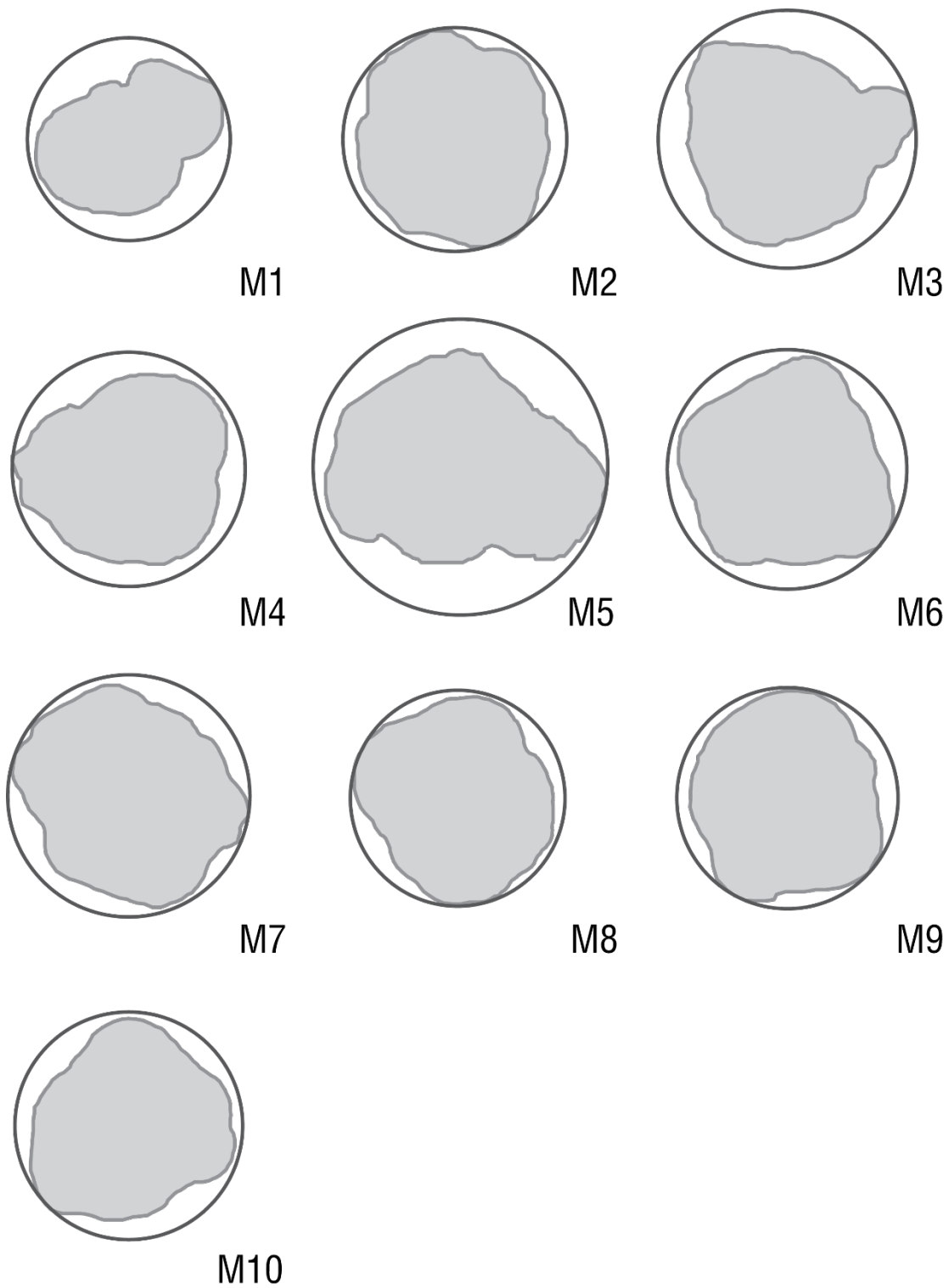


Figura 39 Circularidad de los cúmulos de fibra obtenidos con un colector "convencional".

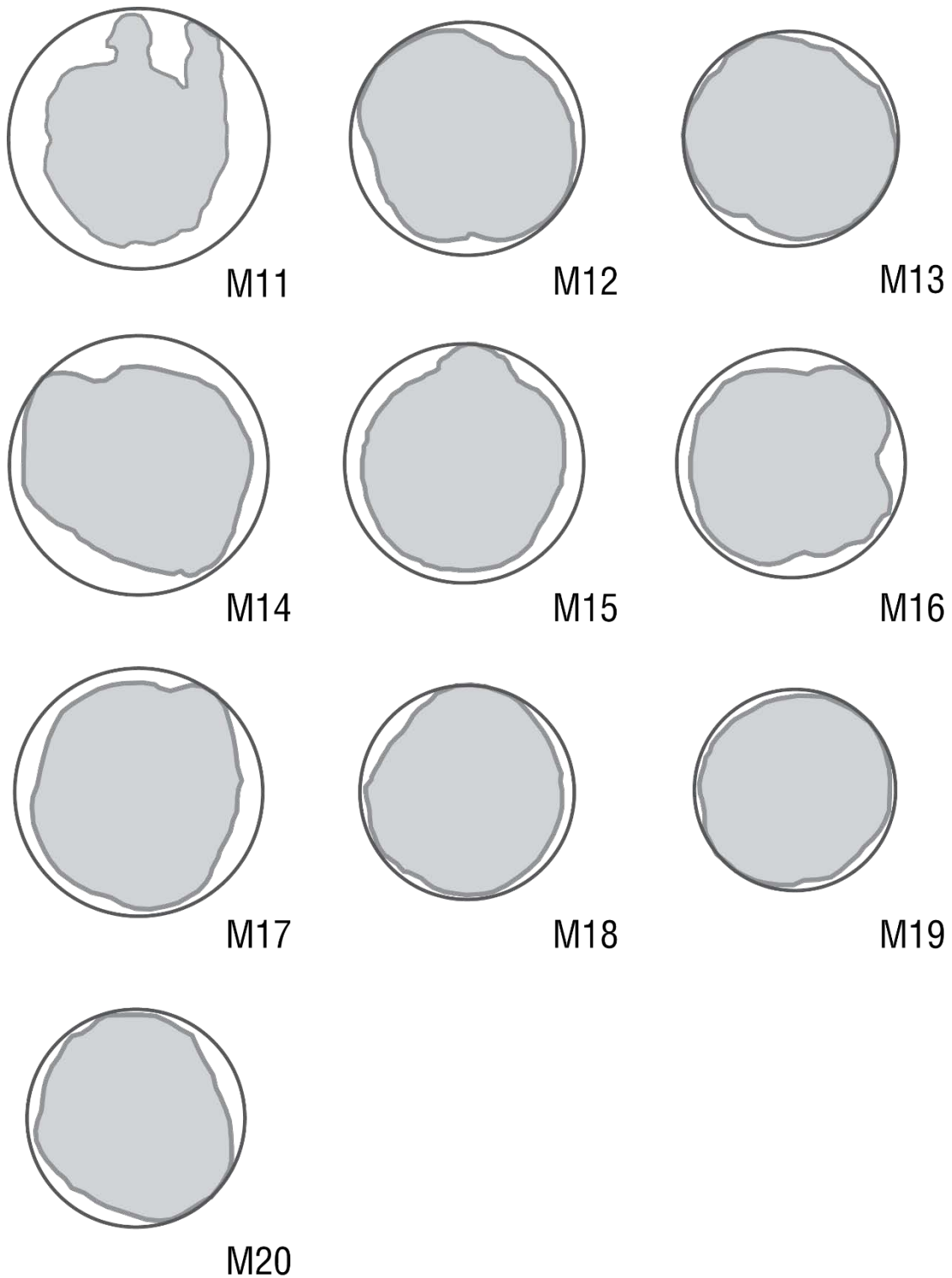


Figura 40 Circularidad de los cúmulos de fibra obtenidos con un colector "cinemático".

Los resultados de medición de las áreas AC_i para cada muestra se presentan en la tabla 12, con estos resultados se obtuvieron los valores de circularidad C_i los cuales se presentan en la tabla 13.

Tabla 12 Resultados de medición de área AC_i

Colector “convencional”		Colector “cinemático”	
Muestra M_i	Área $AC_i [mm^2]$	Muestra M_i	Área $AC_i [mm^2]$
M_2	2226.66	M_{12}	2682.62
M_3	2968.59	M_{13}	2277.32
M_4	2433.56	M_{14}	3310.90
M_5	3879.27	M_{15}	2825.07
M_6	2560.11	M_{16}	2582.12
M_7	2620.80	M_{17}	3034.11
M_8	2063.40	M_{18}	2263.15
M_9	2173.36	M_{19}	2003.66
M_{10}	2317.85	M_{20}	2342.06

Tabla 13 Resultados de circularidad C_i

Colector “convencional”		Colector “cinemático”	
Muestra M_i	Circularidad $C_i [mm^2/mm^2]$	Muestra M_i	Circularidad $C_i [mm^2/mm^2]$
M_2	1.20	M_{12}	1.22
M_3	1.59	M_{13}	1.12
M_4	1.41	M_{14}	1.41
M_5	1.60	M_{15}	1.32
M_6	1.34	M_{16}	1.26
M_7	1.29	M_{17}	1.29

M_8	1.21	M_{18}	1.17
M_9	1.22	M_{19}	1.12
M_{10}	1.36	M_{20}	1.22

Finalmente los valores estimados para la circularidad de cúmulo de material depositado sobre los colectores “convencional” y “cinemático” C_{Con} y C_{Cin} , respectivamente, se obtuvieron a partir del promedio aritmético de los resultados de circularidad C_i a los cuales se les agregó un valor de incertidumbre de medición tipo a, estos se presentan en la tabla 14.

Tabla 14 Valores estimados de circularidad

Colector “convencional”		Colector “cinemático”	
C_{Con}	1.36 [mm^2/mm^2]	C_{Cin}	1.24 [mm^2/mm^2]
$u(C_{Con})$	0.05 [mm^2/mm^2]	$u(C_{Cin})$	0.03 [mm^2/mm^2]

4.3.3 Medición de diámetro de fibra

El proceso de medición de los diámetros de fibra D_{Con} y D_{Cin} obtenidos sobre los colectores “convencional” y “cinemático” respectivamente se realizó de acuerdo a las definiciones del mesurando, el principio y el procedimiento de medida descritos en la sección 3.3.3.

El diámetro de fibra obtenido con un colector “convencional” se evaluó a partir de micrografías correspondientes a las muestras M_1, M_2, \dots, M_{10} con las cuales se obtuvieron los resultados de medición $\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_{10}$ que representan los diámetros promedio de las fibras de cada muestra.

El diámetro de fibra obtenido con un colector “cinemático” se evaluó a partir de micrografías correspondientes a las muestras $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{20}$ con las cuales se obtuvieron los resultados de medición $\bar{D}_{11}, \bar{D}_{12}, \dots, \bar{D}_{20}$ que representan los diámetros promedio de las fibras de cada muestra.

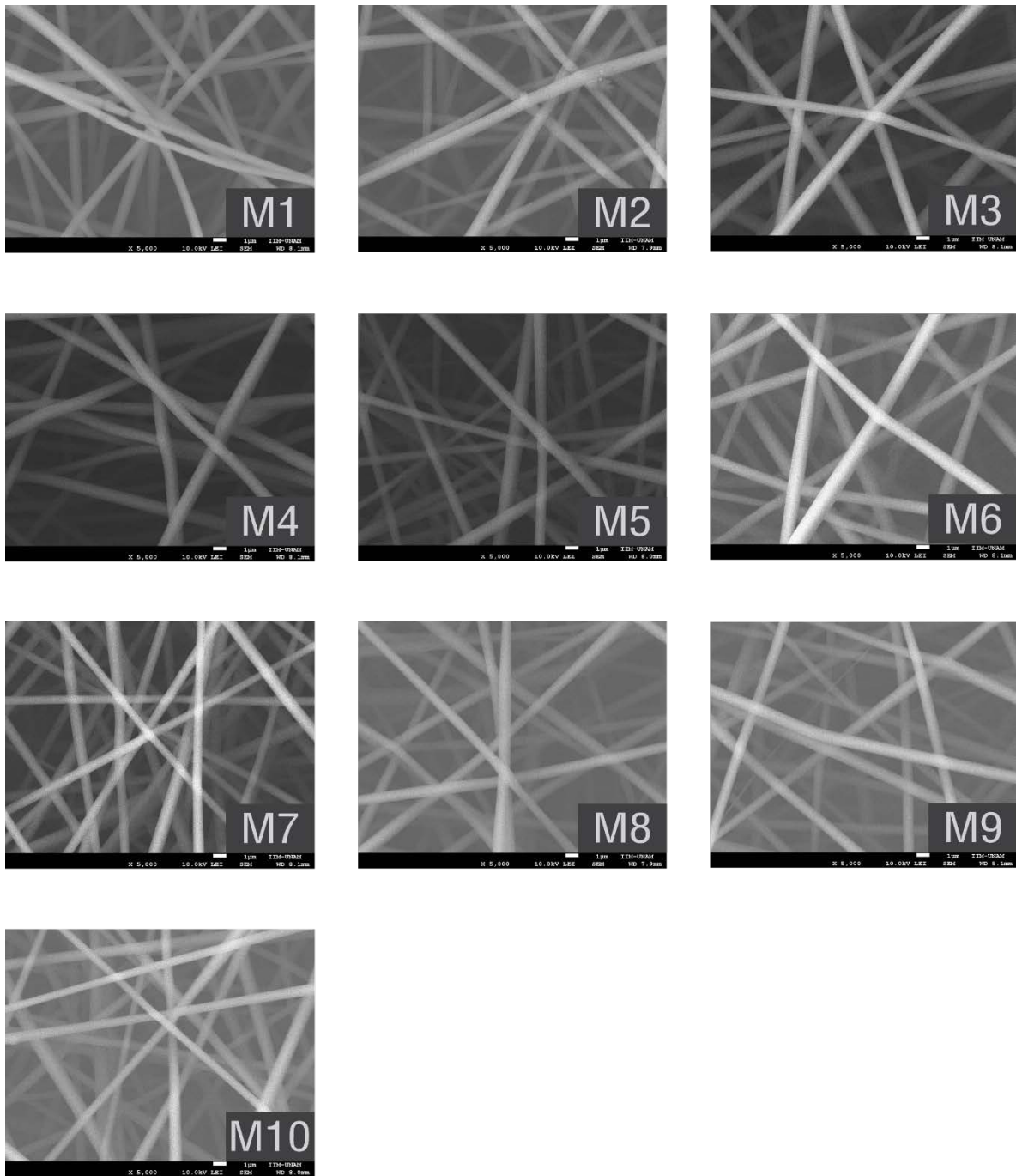


Figura 41 Micrografías de los diámetros de fibra obtenidos con un colector "convencional" (obtenidas mediante micrografías de microscopio electrónico de barrido).

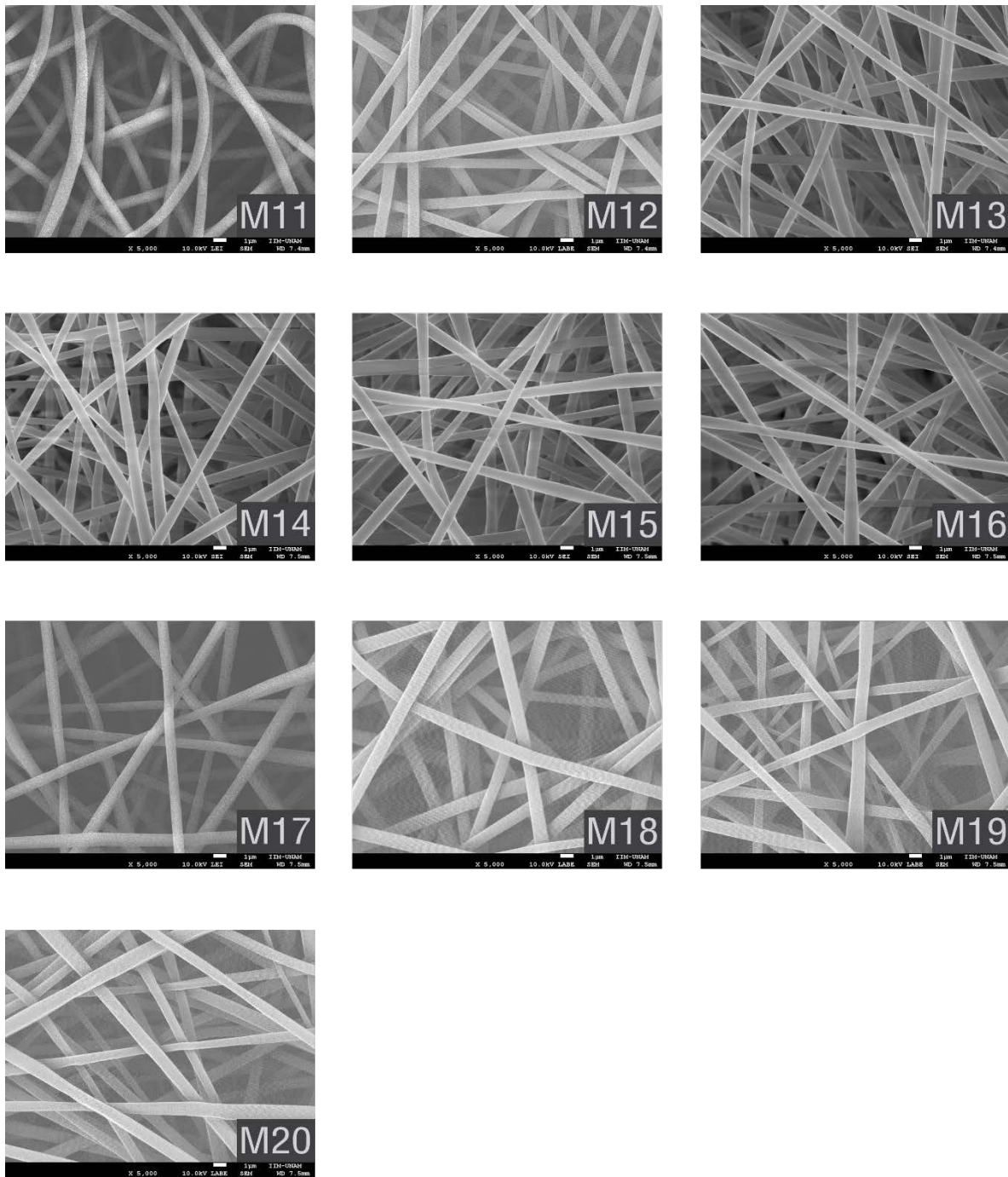


Figura 42 Micrografías de los diámetros de fibra obtenidos con un colector "cinemático" (obtenidas mediante micrografías de microscopio electrónico de barrido).

Los resultados de medición $\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_{10}$ y $\bar{D}_{11}, \bar{D}_{12}, \dots, \bar{D}_{20}$ así como sus valores asociados de desviación típica e incertidumbre de medición se presentan en la tabla 15.

Tabla 15 Resultados de medición

Muestra M_i	Diámetro promedio $D_i [\mu m]$	Desviación típica $S(D_i) [\mu m]$	Incertidumbre típica $u(D_i) [\mu m]$
M1	0.8602	0.0999	0.0063
M2	0.9376	0.1340	0.0085
M3	0.9761	0.1566	0.0099
M4	1.0603	0.1288	0.0081
M5	0.9118	0.1957	0.0124
M6	1.0011	0.2025	0.0128
M7	0.7243	0.1365	0.0086
M8	0.8534	0.1252	0.0079
M9	0.8714	0.1048	0.0066
M10	0.7132	0.1323	0.0084
M11	0.8594	0.0943	0.0060
M12	0.8098	0.0701	0.00443
M13	0.7971	0.0954	0.0060
M14	0.9041	0.1186	0.0075
M15	0.8933	0.1361	0.0086
M16	0.9404	0.1113	0.0070
M17	0.9119	0.1415	0.0089
M18	1.0330	0.0870	0.0055
M19	0.8648	0.1520	0.0096
M20	1.0242	0.1566	0.0099

Finalmente, los valores estimados para los diámetros de fibra D_{Con} y D_{Cin} obtenidos sobre los colectores “convencional” y “cinemático” se obtuvieron a partir del promedio aritmético de los resultados D_i , a los cuales se les agregó un valor de incertidumbre de medición tipo A, estos se presentan en la tabla 16.

Tabla 16 Valores estimados de los diámetros de fibra

Colector “convencional”		Colector “cinemático”	
D_{Con}	0.8909 $[\mu m]$	D_{Cin}	0.9038 $[\mu m]$
$u(D_{Con})$	0.0354 $[\mu m]$	$u(D_{Cin})$	0.0250 $[\mu m]$
$S(D_{Con})$	0.1119 $[\mu m]$	$S(D_{Cin})$	0.0792 $[\mu m]$

La gráfica de los diámetros promedio para las muestras obtenidas sobre el colector “convencional”, contenidos dentro de las bandas de desviación típica e incertidumbre de medición tipo A $D_{Con} \pm S_{Con}$ y $D_{Con} \pm u(D_{Con})$ se muestra en las figuras 43 y 44 respectivamente.

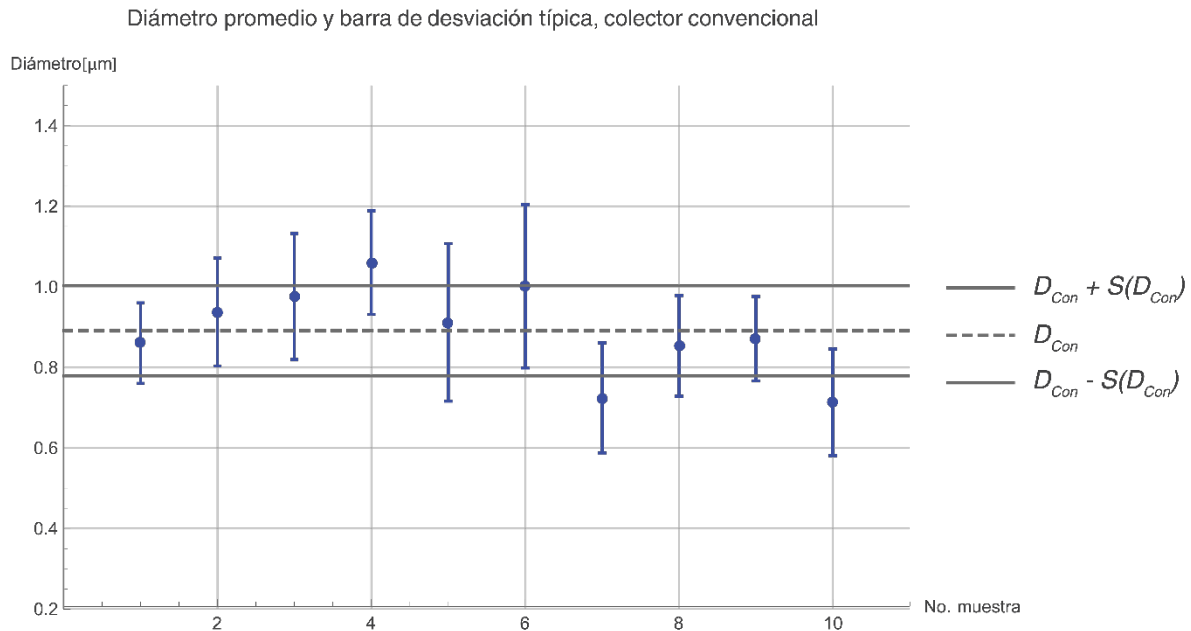


Figura 43 Gráfica de los diámetros de fibra obtenidos con un colector "convencional", dentro de las bandas de desviación típica.

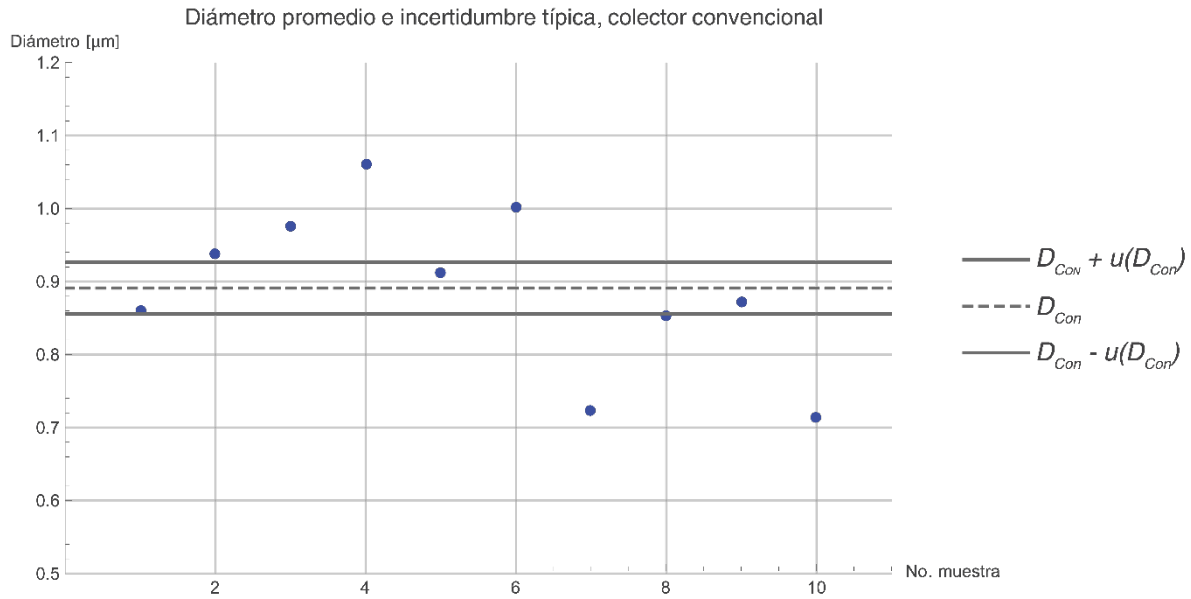


Figura 44 Gráfica de los diámetros de fibra obtenidos con un colector “convencional”, dentro de las bandas de incertidumbre de medición.

La gráfica de los diámetros promedio para las muestras obtenidas sobre el colector “cinemático”, contenidos dentro de las bandas de desviación típica e incertidumbre de mediación tipo A, $D_{Cin} \pm S_{Cin}$ y $D_{Cin} \pm u(D_{Cin})$, se muestra en las figuras 45 y 46 respectivamente.

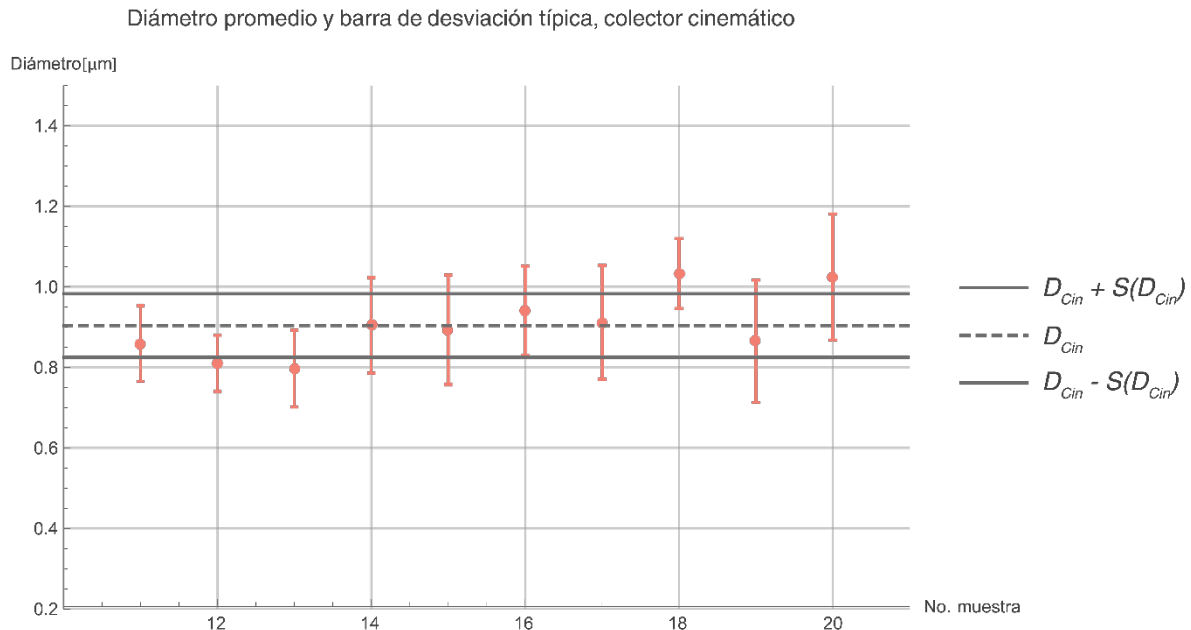


Figura 45 Gráfica de los diámetros de fibra obtenidos con un colector "cinemático", dentro de las bandas de desviación típica.

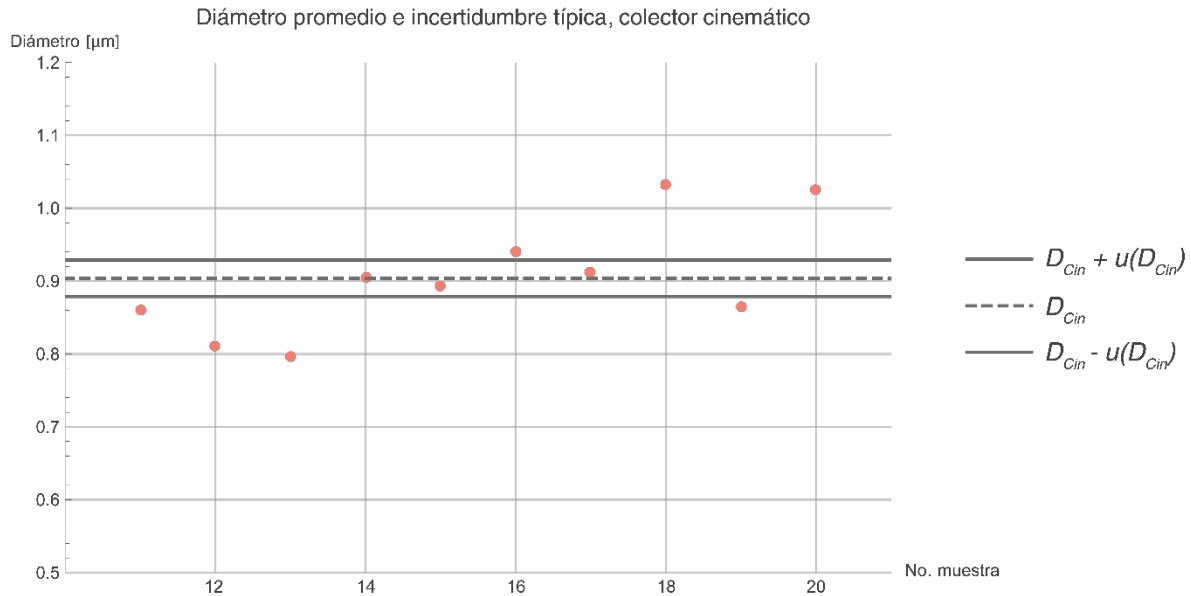


Figura 46 Gráfica de los diámetros de fibra obtenidos con un colector "cinemático", dentro de las bandas de incertidumbre de medición.

En la figura 47 se presenta una comparación entre los valores estimados para los diámetros de fibra D_{Con} y D_{Cin} , así como su correspondiente incertidumbre de medición tipo A, en los cuales se observa una ligera variación entre sí a pesar de haberse obtenido bajo las mismas condiciones experimentales y metrológicas. Esto se puede explicar debido a que el diámetro de fibra obtenido bajo la técnica de electrohilado depende de la distancia capilar a colector como se demuestra en investigaciones de parámetros experimentales (Theron, Zussman, & Yarin, 2004) (Thompson, Chase, Yarin, & Reneker, 2007), y justamente las muestras obtenidas con un colector "convencional" tienen menos precisión en este parámetro comparadas con las muestras obtenidas con "colector cinemático" por lo cual existe una imposibilidad técnica debido al experimento.

Comparativa de los diámetros de fibra D_{Con} vs D_{Cin}

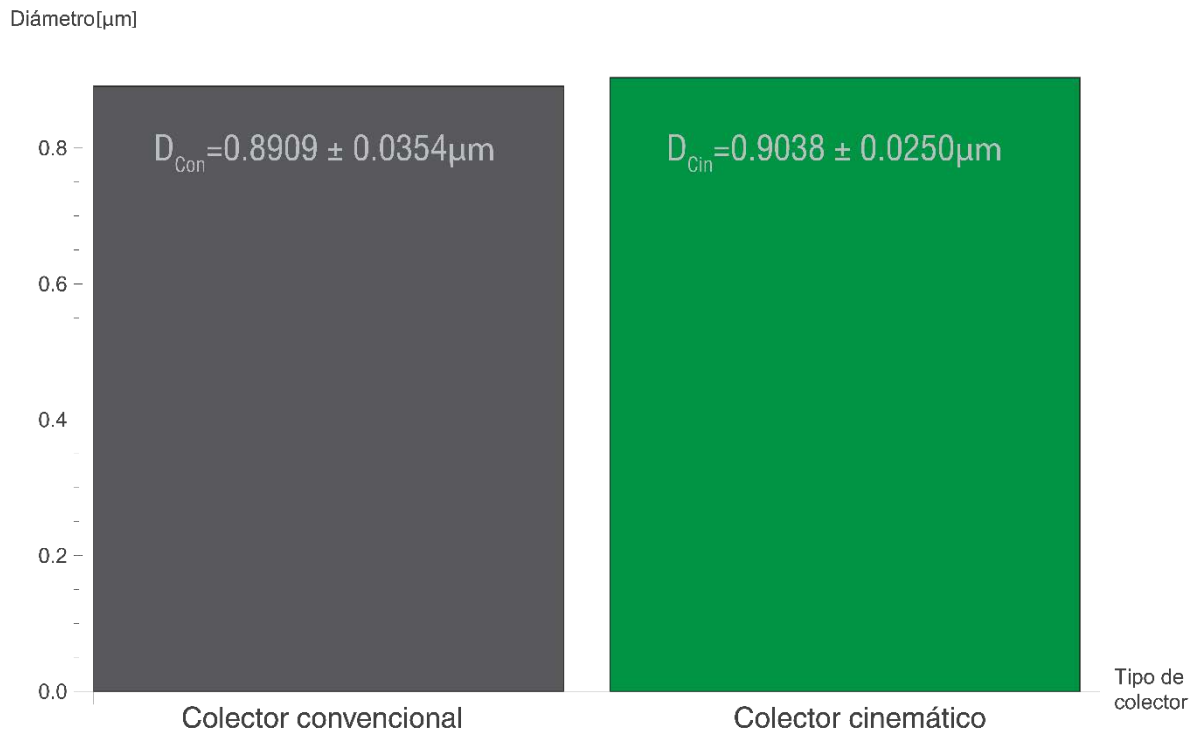


Figura 47 Gráfica comparativa de los diámetros de fibra obtenidos con los colectores “convencional”, y “cinemático”.

En cuanto a la incertidumbre de medición, el colector de fibras “cinemático” presenta una **disminución del 30%** respecto al colector de fibras “convencional”.

Comparativa de las incertidumbres de medición
 $u(D_{Con})$ vs $u(D_{Cin})$

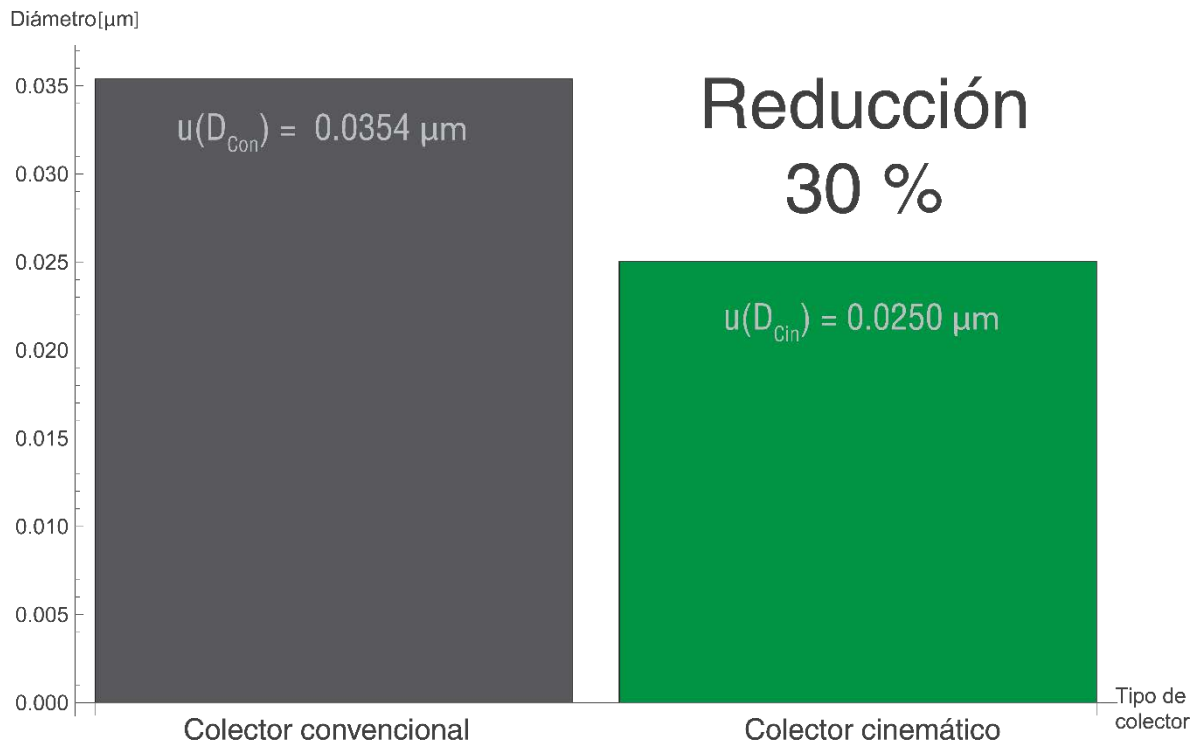


Figura 48 Gráfica comparativa de las incertidumbres de medición en el diámetro de fibra, obtenidas con los colectores “convencional”, y “cinemático”.

4.4 Análisis estadístico

4.4.1 Prueba de hipótesis

Retomando la construcción de hipótesis mostrada en el capítulo 1, la cual estaba basada en la varianza de los diámetros de fibra D_{Con} y D_{Cin} obtenidos sobre colectores “convencional” y “cinemático”, se tenía:

Hipótesis nula

La precisión de los diámetros de fibra obtenidos con un colector “convencional”, es igual a la precisión de los diámetros de fibra obtenidos con un colector “cinemático”, lo cual se expresa en la Ecuación 1.

$$\frac{\sigma^2(D_{Con})}{\sigma^2(D_{Cin})} = 1 \quad (1)$$

Hipótesis de investigación

La precisión de los diámetros de fibra obtenidos con un colector “convencional”, es menor a la precisión de los diámetros de fibra obtenidos con un colector “cinemático”, lo cual se expresa en la Ecuación 2.

$$\frac{\sigma^2(D_{Con})}{\sigma^2(D_{Cin})} > 1 \quad (2)$$

La prueba de hipótesis, se realizó a con la prueba no paramétrica de Canover a un nivel de significancia de 1%. Para esto se utilizó el software *Wolfram Mathematica* versión 10.4, el valor P obtenido fue de 3.85×10^{-23} , dado que este valor fue menor que el valor de significancia seleccionado **0.01**, la hipótesis nula se rechazó a tal nivel de significancia a favor de la hipótesis de investigación.

4.4.2 Control de calidad

Para las muestras M_1, M_2, \dots, M_{10} y $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{20}$, obtenidas con un colector “convencional” y uno “cinemático”, se realizó un estudio de control de calidad del diámetro de fibra obtenido durante el proceso de electrohilado, para esto se utilizó una gráfica de 3 sigmas (Devore, 2008).

El gráfico propuesto se basa en colocar los diámetros promedio \bar{D}_i dentro de un *límite inferior de control LIC* y un *límite superior de control LSC* los cuales se calculan de acuerdo a las ecuaciones 17 ,18 para el colector “convencional”, y 19,20 “para el colector cinemático”.

$$LIC = D_{Con} - 3\sigma_{\bar{D}_i} = D_{Con} - 3 \frac{\sigma(\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_{10})}{\sqrt{10}} \quad (17)$$

$$LSC = D_{Con} + 3\sigma_{\bar{D}_i} = D_{Con} + 3 \frac{\sigma(\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_{10})}{\sqrt{10}} \quad (18)$$

$$LIC = D_{Cin} - 3\sigma_{\bar{D}_i} = D_{Cin} - 3 \frac{\sigma(\bar{D}_{11}, \bar{D}_{12}, \dots, \bar{D}_{20})}{\sqrt{10}} \quad (19)$$

$$LSC = D_{Cin} + 3\sigma_{\bar{D}_i} = D_{Cin} + 3 \frac{\sigma(\bar{D}_{11}, \bar{D}_{12}, \dots, \bar{D}_{20})}{\sqrt{10}} \quad (20)$$

Para estimar la desviación típica σ , se utilizó un estimador insesgado basado en las desviaciones típicas muestrales S_1, S_2, \dots, S_{10} y $S_{11}, S_{12}, \dots, S_{20}$, el cual se muestra en las ecuaciones 21-23, donde G es la función gamma, n el número de elementos de la muestra (250), y k el número de muestras (10).

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{S}_i}{a_n} \quad (21)$$

$$\bar{S}_i = \frac{\sum_{i=1}^k S_i}{k} \quad (22)$$

$$a_n = \frac{\sqrt{2} G\left(\frac{n}{2}\right)}{\sqrt{n-1} G\left(\frac{n-1}{2}\right)} \quad (23)$$

De tal manera que el límite inferior de control, y el límite superior de control se calculan como se muestra en las ecuaciones 24,25.

$$LIC = D - 3 \frac{\bar{S}_i}{a_n \sqrt{n}} \quad (24)$$

$$LSC = D + 3 \frac{\bar{S}_i}{a_n \sqrt{n}} \quad (25)$$

Los límites de control calculados se encuentran tabulados en la tabla 18, donde puede apreciarse una reducción del ancho de banda formada por la diferencia entre el LSC-LIC para las muestras fabricadas con el colector “cinemático”, debido a que estas mediciones son más precisas.

Tabla 17 Límites de control gráfica \bar{X}

Límites de control	Colector convencional [μm]	Colector cinemático [μm]
LIC	0.86403	0.88170
LSC	0.91783	0.92587
LSC-LIC	0.05380	0.04417

Las gráficas de control de calidad del diámetro de fibra obtenido durante el proceso de electrohilado utilizando los colectores “convencional” y “cinemático” se presenta en las figuras 49 y 50. Puede apreciarse que el proceso realizado con un colector de fibras “convencional” está fuera de control 8 de 10 veces, mientras que la contraparte llevada a cabo con un colector “cinemático” 7 de 10 veces. Si bien los resultados muestran que ambos procesos están fuera de control la mayor parte del tiempo, el proceso llevado a cabo con un colector de fibras “cinemático” presenta una mejora considerable.

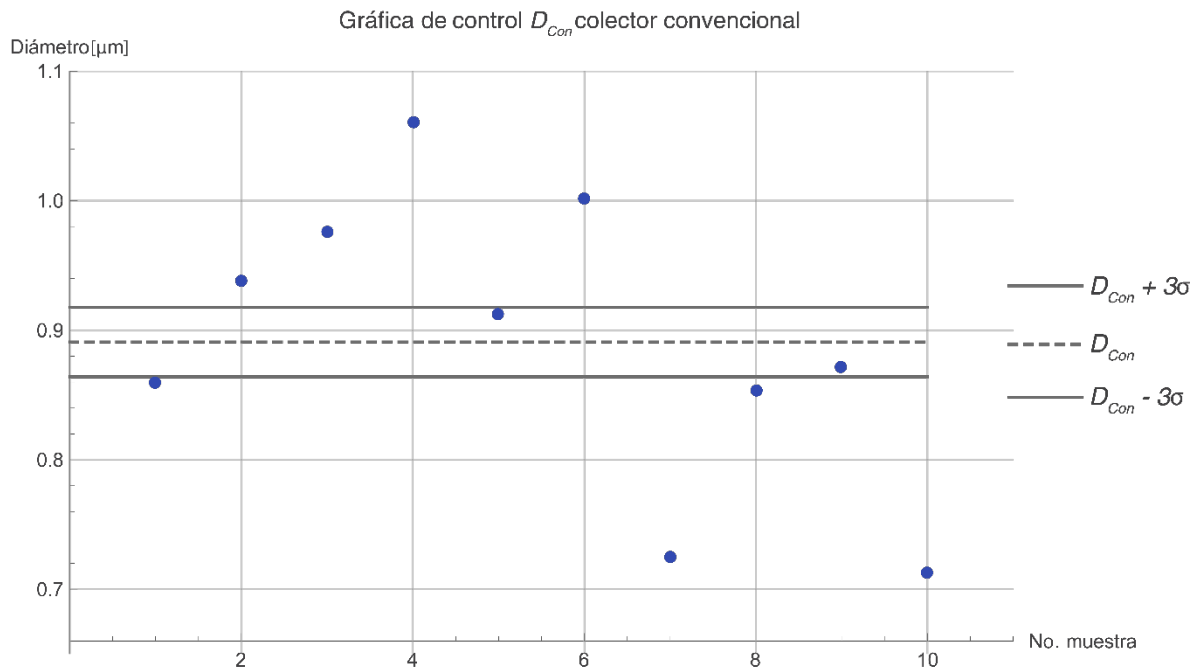


Figura 49 Gráfica de control de calidad del diámetro de fibra obtenido con un colector "convencional".

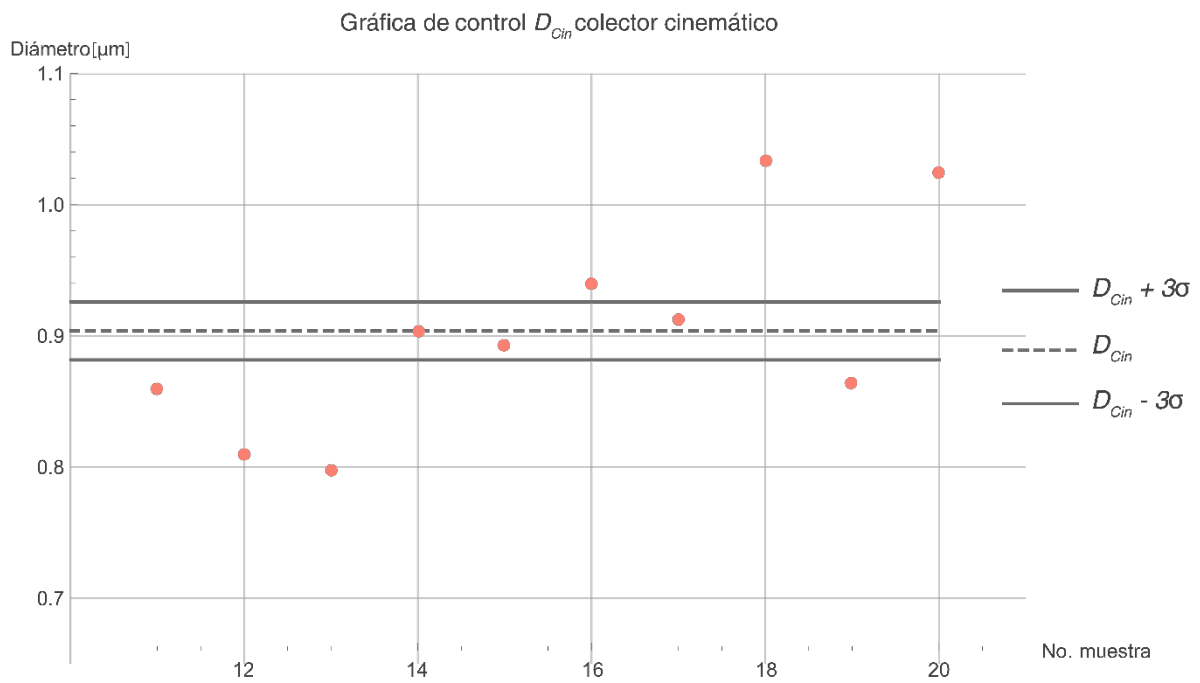


Figura 50 Gráfica de control de calidad del diámetro de fibra obtenido con un colector "cinemático".

4.5 Estudio comparativo

4.5.1 Comparativa colector “convencional” vs colector “cinemático”

La comparativa entre la precisión del diámetro de fibra conseguido con un colector de fibras “convencional” y uno “cinemático”, se presenta a partir de las curvas de densidad de probabilidad de los diámetros de fibra.

En la figura 51, puede apreciarse la notable reducción en el ancho de la geometría de la campana asociada al colector “cinemático”, lo cual implica datos menos dispersos, y por consiguiente más precisos.

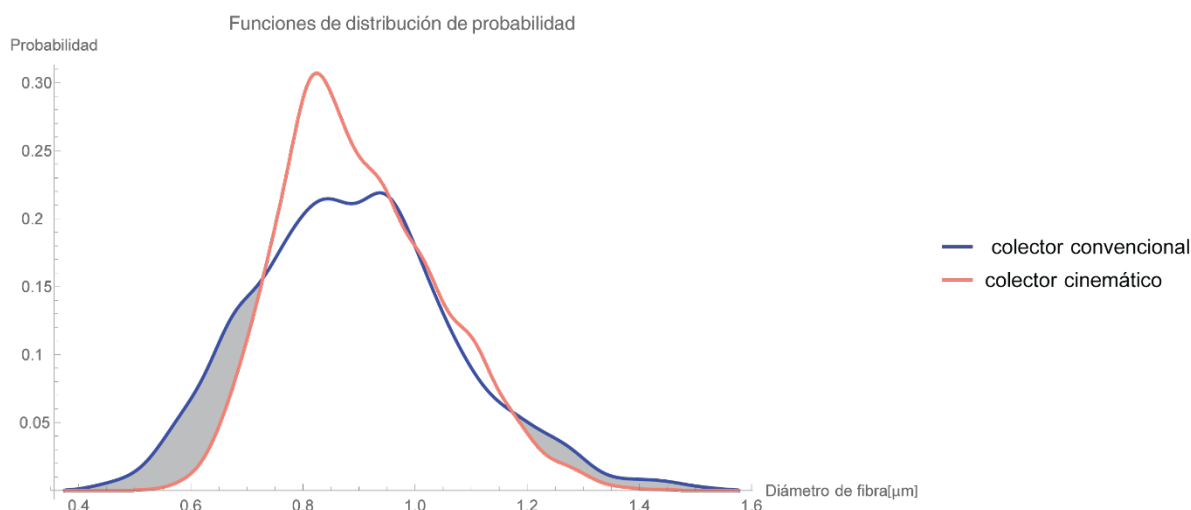


Figura 51 Comparativa de las funciones de distribución de probabilidad de los diámetros de fibra obtenidos con los colectores “convencional” y “cinemático”.

4.5.2 Comparativa con otros trabajos reportados

Para poner en contexto la precisión del diámetro de fibra conseguida con el colector de fibras “cinemático”, se presenta una comparación con la precisión en el diámetro de fibra reportado en investigaciones previas realizadas dentro del laboratorio de nanofibras del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, para lo cual se seleccionaron trabajos publicados en los cuales se halla utilizado la misma disolución polimérica y similares condiciones del proceso de electrohilado. (Ospina Orejarena, 2011), (Gómez Pachón, 2013), (Navarro Cerón, 2014), (Muñoz Ramírez, 2014).

En la tabla 19 se presentan el resumen de los resultados reportados, a partir de estos se calculó el coeficiente de variación $CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\%$, el cual es una medida de dispersión que cuantifica que tan grande es la desviación típica respecto a la media.

Tabla 18 Comparación de coeficientes de variación

Autor	Diámetro promedio [μm]	Desviación típica experimental [μm]	Coeficiente de variación [%]	Parámetros
Gómez	0.992	0.257	26	PLA en trifluoroetanol 16% masa/volumen, 0.6ml/h, 15kV, 30 cm
Muñoz	0.760	0.380	50	PLA en trifluoroetanol 16% masa/volumen, 0.6 ml/hr, 15 kV, 30 cm
Navarro	0.957	0.405	42	PLA en trifluoroetanol 13% masa/volumen, 0.4 ml/hr, 10kV, 10 cm
Ospina	0.841	0.152	18	PLA en trifluoroetanol 13% masa/volumen, 0.4ml/h, 10kV, 10 cm
Colector “convencional”	0.89093	0.11193	13	PLA en trifluoroetanol 13% masa/volumen, 0.4 ml/hr, 10kV, 10 cm
Colector “cinemático”	0.90379	0.07917	9	PLA en trifluoroetanol 13% masa/volumen, 0.4 ml/hr, 10kV, 10 cm

Una gráfica de barras comparando los diversos coeficientes de variación para los diámetros de fibra reportados se presenta en la gráfica 52.

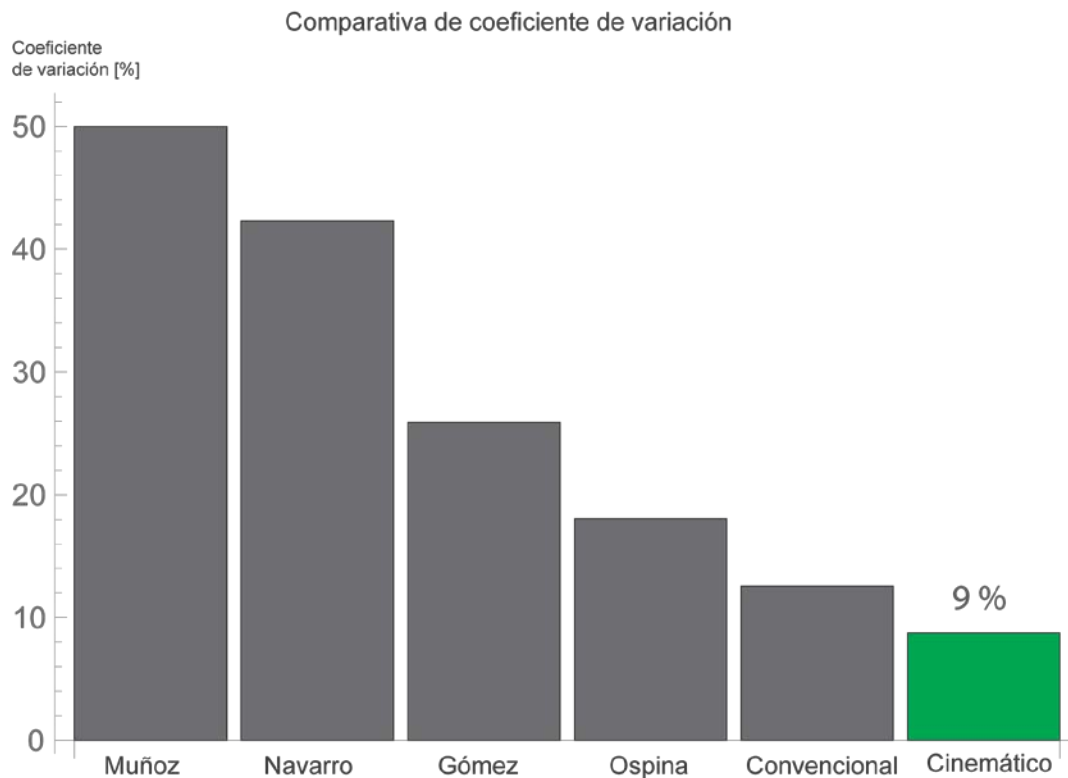


Figura 52 Comparativa de los coeficientes de variación del diámetro de fibra.

La representación gráfica de los coeficientes de variación reportados permite poner en contexto la notable mejora que presenta el colector de fibras “cinemático” para la obtención de diámetros de fibra con mayor precisión, en comparación con colectores “convencionales”.

5 CONCLUSIONES

De acuerdo a la metodología experimental desarrollada en este trabajo, se puede concluir que la precisión de medida asociada al diámetro de fibra de una membrana electrohilada mejora conforme aumenta la precisión en el posicionamiento entre capilar y colector de fibras. Esto se comprobó a partir de un análisis estadístico basado en comparar las varianzas de los diámetros de fibra obtenidos con un colector posicionado manualmente (colector convencional), y uno posicionado mediante conexiones cinemáticas desmontables (colector cinemático). Este argumento se sustenta en inferencia estadística realizada mediante el test no paramétrico de Canover a un nivel de significancia del 1%.

Los resultados experimentales indican que el colector de fibras “cinemático” ofrece una mejora del 30% en cuanto a aumento de precisión e incertidumbre de medición, comparado contra un colector “convencional”. Las fibras obtenidas con un colector “cinemático” consiguieron un coeficiente de variación para el diámetro de fibra del 9%, el más bajo hasta ahora reportado en el laboratorio de nanofibras del Instituto de Investigaciones en Materiales, este valor puede disminuirse aún más ya que para esta investigación se puso especial atención solo al parámetro distancia capilar a colector, dejando de lado otros parámetros gobernantes del proceso de electrohilado.

A pesar de que el aumento en los niveles de precisión de un proceso conlleva a la obtención de resultados y productos con mayor calidad científica y tecnológica, estos niveles deben estar en función de la aplicación final del producto, por lo que es necesario evaluar la relación costo beneficio para no sobre diseñar un sistema.

La teoría y principios de diseño cinemático permitieron obtener soluciones eficientes con altos grados de precisión asociada, para lo cual no fueron necesarios procesos de manufactura con tolerancias dimensionales y geométricas estrictas, ya que la precisión en estos sistemas no se consigue por estos medios, sino a través de la cinemática de los cuerpos.

5.1 Recomendaciones

Cabe mencionar que el colector de fibras “cinemático” no cuenta con las características adecuadas para ser utilizado masivamente dentro de un laboratorio de investigación. Este colector fue diseñado para evaluar la repercusión que tiene el posicionamiento del colector, en la calidad del diámetro de fibra obtenido. Por lo que su uso por el usuario final está fuera de los alcances de este trabajo.

Sin embargo, este colector podría ser utilizado por el usuario final dentro de un laboratorio de investigación, siempre y cuando se analicen los materiales y acabados superficiales que intervienen en las conexiones cinemáticas desmontables, para prevenir el desgaste de las superficies de contacto, el cual podría disminuir el rendimiento del sistema.

5.2 Trabajo futuro

Se propone utilizar el proceso de electrohilado para caracterizar la precisión de movimiento conseguido en sistemas de móviles, como mecanismos y conexiones mecánicas. Esta propuesta surge debido a que los sistemas metrológicos utilizados para caracterizar precisión de movimiento en el orden de micras a nanómetros, generalmente implican sistemas mecánicos y/o mecatrónicos complejos con altos estándares de calidad, que a su vez implican a altos costos.

Sin embargo, el electrohilado es un proceso de fácil implementación tecnológica con el cual se pueden obtener fibras con diámetros en escala micro y nanométrica, los cuales son altamente sensibles a defectos en la alineación entre un inyector y un colector de fibras, fenómeno que pudiera aprovecharse para relacionarlo con la precisión de movimiento de un sistema.

REFERENCIAS

- Blanding, D. L. (1999). *Exact Constraint: Machine Design Using Kinematic Principles*. ASME Press.
- Bradick, H. J. (1960). *Mechanical design of laboratory apparatus*. Chapman & Hall.
- Cai, S., Xu, H., Jiang, Q., & Yang, Y. (2013). Novel 3D electrospun scaffolds with fiber oriented randomly and evenly in three dimensions to closely mimic the unique architectures of extracellular matrices in soft tissues: fabrication and mechanism study. *Langmuir*, 29, 2311-2318.
- Centro Español de Metrología. (2009). *GUM Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*. España.
- Cooley, J. F. (1902). *US Patent No. 692,631*.
- Dan, L., & Younan, X. (2004, julio). Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel? *Advanced Materials*, 16(14), 1151-1169.
- Devore, J. L. (2008). Métodos de control de calidad. In *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (pp. 625-627). Mexico: Cenage Learning Editores.
- Donaldson, R. R. (1972). The deterministic approach to machining accuracy. *Society of Manufacturing Engineers Fabrication Technology Symposium*.
- Doshi, J., & Reneker, D. H. (1995). Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers. *Journal of electrostatics*, 35, 151-160.
- Duesman, K., & Farnworth, W. M. (2001, Abril 17). *U.S. Patent No. US 6217232 B1*.
- Electrospinning for Pharmaceutical Application*. (2016, 5 25). Retrieved from <http://electrospunforpharm.blogspot.mx/>
- Fernandes, P. R., & Bartolo, P. J. (2011). Advances on modeling in tissue engineering. In G. R. Mitchell, & F. Davis, *Electrospinning and tissue engineering* (pp. 111-134). Springer.
- Formhals, A. (1934). *US Patent No. 1975504*.
- Frantz, C., Stewart, K. M., & Weaver, V. M. (2010). The extracellular matrix at a glance. *Journal of cell science*, 123, 4195-4200.
- Glegg, G. L. (1972). Selection by content. In *The selection of design* (pp. 41-52). Cambridge University Press.
- Gómez Pachón, E. Y. (2013). *Estudio teórico-experimental de las propiedades elásticas de nanofibras poliméricas (tesis doctoral)*. Mexico.

- Guoping, C., Takashi, U., & Tetsuya, T. (2002). Scaffold design for tissue engineering. *Macromolecular Bioscience*, 2, 67-77.
- Hale, L. C. (1999). *Principles and techniques for designing precision machines Tesis doctoral*. California USA.
- Hall, R. R., & Lin, H. T. (2001, Mayo 22). *Estados Unidos de Norteamérica Patent No. US 6234687 B1*.
- Hall, R. R., & Lin, H. T. (2001, Mayo 22). *U.S. Patent No. US 6234687 B1*.
- Hollister, S. J. (2005). Porous scaffold design for tissue engineering. *Nature Materials*, 4, 518-524.
- Hutcheson, D., & Hutcheson, J. (1995). Technology and Economics in the Semiconductor Industry. *Scientific American*.
- Kim, G. H., Cho, Y. S., & Kim, W. D. (2006). Stability analysis for multi-jets electrospinning process modified with a cylindrical electrode. *European Polymer Journal*, 42, 2031-2038.
- Liu, C., Xia, Z., & Czernuszka, T. (2007). Design and development of three dimensional scaffolds for tissue engineering. *Chemical Engineering Research and Design*, 1051-1064.
- Mallick, S., Tripathi, S., & Srivastava, P. (2015). Advancement in Scaffold for Bone Tissue Engineering: A review. *Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, 37-54.
- Maxwell, J. C. (2003). General Considerations Concerning Scientific Apparatus. In *The Scientific Papers Of James Clerk Maxwell* (Vol. 2, p. 816). Courier Dover Publications.
- Muñoz Ramírez, L. D. (2014). *Comportamiento micro y macro mecánico de andamios electrohilados de poli (ácido láctico)/hidroxiapatita (Tesis de licenciatura)*. México.
- Murray, R. K., Bender, D. A., & Botham, K. M. (2010). Bioquímica ilustrada. In R. K. Murray, & F. W. Keeley, *La matriz extracelular* (pp. 527-544). Mc Graw Hill.
- Navarro Cerón, A. (2014). *Obtención de andamios por electrohilado de poli (ácido láctico) y colágena de dentina de bovino (tesis de maestría)*. Mexico.
- Ospina Orejarena, A. (2011). *Obtención y caracterización de nanofibras de poli (ácido láctico) modificado con colágeno mediante la técnica de electrohilado (tesis de maestría)*. México.
- P. Gartner, L. (2001). Texto Atlas de histología. In L. P. Gartner, *Matrix Extracelular* (pp. 69-81). Mc Graw Hill.
- Rana, M. P., & Rana, T. (2015). Tissue engineering. An emerging approach in periodontics. *International Journal of Information Research and Review*, 2(02), 407-411.

- Rothenhofer, G., Slocum, A., & Kitajima, K. (2013). An adjustable kinematic coupling for use in machine tools with a tight structural loop. *Precision Engineering*(37), 61-72.
- Rutledge, G. C., & Fridrikh, S. V. (2007). Formation of fibers by electrospinning. *Advanced drug delivery reviews*, 1384-1391.
- Sachlos, E., & Czernuszka, J. T. (2003). MAKING TISSUE ENGINEERING SCAFFOLDS WORK. *EE.u Sroapchealons Caenldls J a.Tn.d C Mzeartneruisazlks*, 5, 29-40.
- Schellekens, P., Vermeulen, H., Vermeulen, M., Wetzels, S., & Pril, W. (n.d.). Design for Precision: Current Status and Trends.
- Schmidt, V., & Belegatis, M. R. (2013). Laser Technology in Biomimetics. In S. Engelhardt, *Direct laser Writing* (pp. 13-65). Berlin: Springer.
- Sistema Interamericano de Metrología. (2008). *Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)*.
- Slocum, A. (2010). Kinematic couplings: A review of design principles and applications. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*(50), 310-327.
- Slocum, A., & Weber, A. (2003). Precision Passive Mechanical Alignment of Wafers. *Journal of microelectromechanical systems*, 12(6), 826-834.
- Sun, B., Long, Y. Z., Zhang, H. D., Li, M. M., Duvail, J. L., Jiang, X. Y., & Yin, H. L. (2014). Advances in three dimensional nanofibrous macrostructures via electrospinning. *Progress in Polymer Science*, 39, 862-890.
- Taylor, G. I. (1964). Desintegrations of water drops in an electric field. *Proceedings of the Royal Society of London Series Mathematical and Physical sciences*, 280(138), 383-397.
- Theron, S. A., Zussman, E., & Yarin, A. L. (2004). Experimental investigation of the governing parameters in the electrospinning of polymer solutions. *Polymer*, 2017-2030.
- Thiriet, M. (2011). Cell and Tissue Organization in the Circulatory and Ventilatory Systems. In *Extracellular Matrix*. New york: Springer .
- Thompson, C. J., Chase, G. G., Yarin, A. L., & Reneker, D. H. (2007). Effect of parameters on nanofiber diameter determined from electrospinning model. *Polymer*, 48(23), 6913-6922.
- Varesano, A., Rombaldoni, F., Mazzuchetti, G., Tonin, C., & Comotto, R. (2010). Multi-jet nozzle electrospinning on textile substrates: observations on process and nanofiber mat deposition. *Polymer International*, 59, 1606-1615.
- Wang, X., Wang, X., & Lin, T. (2012). Electric field analysis of spinneret design for needleless electrospinning of nanofiber. *Journal of Materials Research*, 27(23), 3013-3019.

