

**Universidad Católica de Santa María**  
**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica,**  
**Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica**



**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS A PARTIR DE NANOFIBRAS  
DE PLA POR ELECTROHILADO**

Tesis presentada por los Bachilleres:

**Llerena Ponce, David Dustyn**

**Zamora Ito, Roy Edson**

para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Mecánico

Asesor:

**Dr. Alcázar Rojas, Hermann Enrique**

**Arequipa – Perú**

**2024**

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA**  
**TITULACIÓN CON TESIS**  
**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 13 de Diciembre del 2023

Dictamen: 010727-C-EPIMMEM-2023

Visto el borrador del expediente 010727, presentado por:

2015248271 - ZAMORA ITO ROY EDSON

2010603031 - LLERENA PONCE DAVID DUSTYN

Titulado:

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS A PARTIR DE NANOFIBRAS DE PLA POR  
ELECTROHILADO**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

29361846 - CHIRE RAMIREZ EMILIO  
DICTAMINADOR



29685318 - CASTRO VALDIVIA JORGE LUIS  
DICTAMINADOR



40386948 - VALDEZ LOAIZA JUAN CARLOS  
DICTAMINADOR



# OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS A PARTIR DE NANOFIBRAS DE PLA POR ELECTROHILADO

## INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

4%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://mywindowofdevelopmentandcooperation.blogspot.com">mywindowofdevelopmentandcooperation.blogspot.com</a>	Fuente de Internet	<1%
2	<a href="http://dialnet.unirioja.es">dialnet.unirioja.es</a>	Fuente de Internet	<1%
3	<a href="http://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a>	Fuente de Internet	<1%
4	Submitted to Universidad Manuela Beltrán	Trabajo del estudiante	<1%
5	<a href="http://ri-ng.uaq.mx">ri-ng.uaq.mx</a>	Fuente de Internet	<1%
6	<a href="http://www.cacic2016.unsl.edu.ar">www.cacic2016.unsl.edu.ar</a>	Fuente de Internet	<1%
7	<a href="http://doaj.org">doaj.org</a>	Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Associacao Paranaense De Cultura	Trabajo del estudiante	<1%

## DEDICATORIA

*A mi madre Lidia, que con su amor, apoyo y constante esfuerzo supo darme el respaldo, el ánimo y el ímpetu para alcanzar esta meta, seguir adelante y lograr todo lo que me proponga en la vida. A mis seres queridos, que estuvieron conmigo, siempre confiaron en mí y en cada uno de los pasos que he dado en la vida, dándome su apoyo incondicional en todo momento. A Dios, que es el pilar en mi vida, y sin él, este logro no sería posible pues es la luz que guía mis pasos y orienta mi camino.*

**Roy Zamora Ito**

*Dedico este logro a mis queridos padres y a mi amada familia, cuyo apoyo inquebrantable ha sido mi faro a lo largo de esta travesía académica. Su amor, aliento y sacrificio han sido la luz que iluminó mi camino hacia este ansiado objetivo. A ustedes, mi gratitud eterna.*

**David Llerena Ponce**

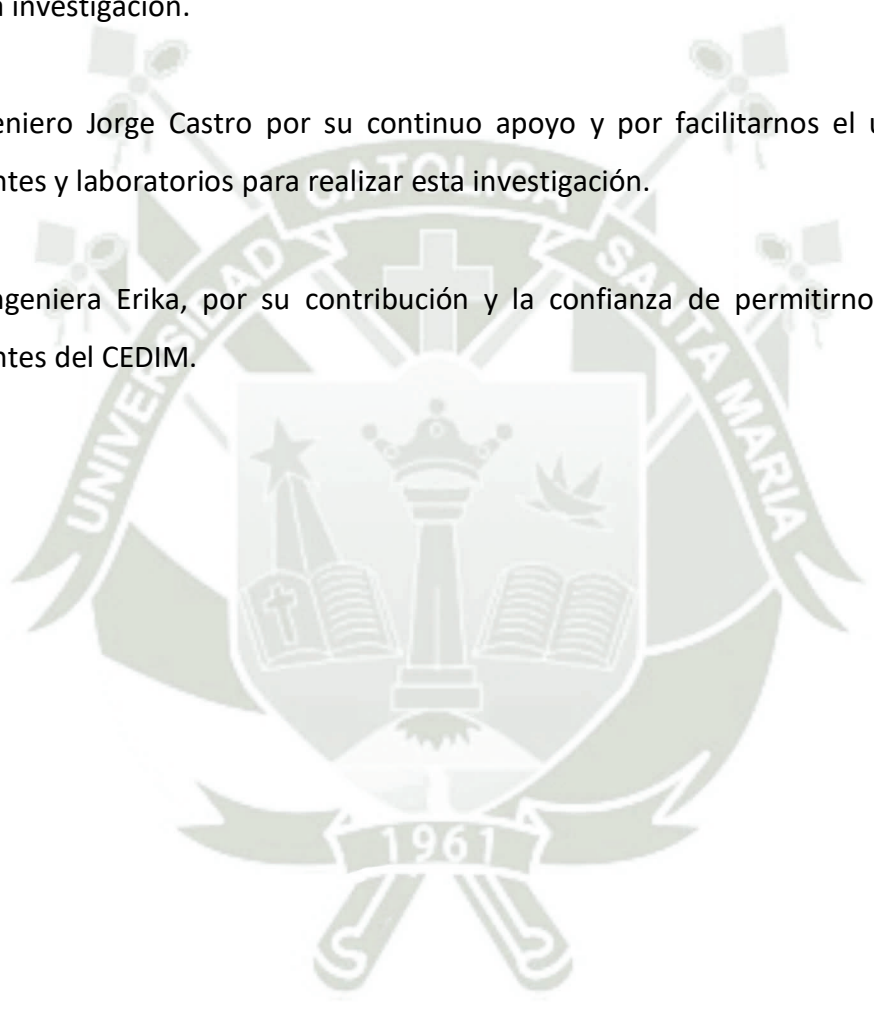
## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de todas las personas involucradas que formaron parte de este logro y nos dieron su apoyo para lograr la culminación de esta investigación.

Al Ingeniero Hermann Alcázar por su completa disposición y asesoramiento en el desarrollo de esta investigación.

Al Ingeniero Jorge Castro por su continuo apoyo y por facilitarnos el uso de diversos ambientes y laboratorios para realizar esta investigación.

A la Ingeniera Erika, por su contribución y la confianza de permitirnos el uso de los ambientes del CEDIM.



## RESUMEN

El electrohilado es una técnica que permite la obtención de fibras a escalas métricas muy pequeñas que oscilan en rangos de los nanómetros hasta los micrómetros, cuyo resultado final es una membrana conformada por estas fibras. Estas características estructurales permiten abordar mayores estudios, por ejemplo, en ámbitos de la ingeniería tisular, la generación de filtros de agua a escala nanométrica o la fabricación de sensores de alta sensibilidad para detectar sustancias químicas o gases, entre otros. La presente investigación detalla el proceso para la obtención de membranas mediante el electrohilado usando una solución polimérica a base de PLA, y su posterior caracterización mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM), técnica que sirve para identificar la morfología y el diámetro de las fibras que conforman la estructura interna de la membrana. Finalmente, se obtuvo resultados con una morfología de fibras en forma de mallas, un entrelazamiento de las fibras siguiendo un patrón de trenzado helicoidal y diámetro de fibras con un valor mínimo de 985,9 nanómetros y un máximo de 8153 nanómetros. También se identifica la variación del diámetro de las fibras en función del voltaje, el caudal de inyección y la concentración de soluto en la solución, dichos parámetros influyen en las características de las membranas obtenidas.

**Palabras Clave:** Electrohilado, nanofibra, PLA, membrana, diámetro.

**ABSTRACT**

Electrospinning is a technique that allows the produce of fibers at very small metric scales ranging from nanometers to micrometers. The final result is a membrane formed by these fibers. These structural characteristics enable further exploration in various fields such as tissue engineering, the development of nanoscale water filters, or the manufacturing of highly sensitive sensors for detecting chemicals or gases, among others. This research outlines the process for obtaining membranes through electrospinning using a PLA-based polymeric solution and their subsequent characterization using scanning electron microscope (SEM), a technique used to identify the morphology and diameter of the fibers that constitute the internal structure of the membrane. Ultimately, the results revealed a fiber morphology forming mesh-like structures, an interweaving of fibers following a helical braiding pattern, and fiber diameters ranging from a minimum of 985,9 nanometers to a maximum of 8153 nanometers. The variation in fiber diameter is also identified in relation to voltage, injection flow rate, and solute concentration in the solution, parameters that influence the characteristics of the membranes obtained.

**Keywords:** Electrospinning, nanofiber, PLA, membrane, diameter.

## ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ABREVIATURAS Y LISTAS DE SÍMBOLOS</b>	
<b>RESUMEN</b>	
<b>ABSTRACT</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1. MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>3</b>
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.2. HIPÓTESIS .....	5
1.3. OBJETIVOS .....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4.1. Tecnológica .....	5
1.4.2. Social .....	5
1.4.3. Ambiental.....	6
1.4.4. Profesional .....	6
1.5. ALCANCES .....	6
1.6. LIMITACIONES .....	6
1.7. ANTECEDENTES .....	7
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>8</b>
2.1. ELECTROHILADO .....	8
2.1.1. Principios electro hidrodinámicos .....	9
2.1.2. Diseño y control del proceso de electrohilado para la obtención de membranas .....	12
2.2. CARACTERÍSTICAS Y ADAPTABILIDAD DEL PLA.....	13

2.2.1. Análisis de las propiedades del PLA .....	14
2.2.2. Consideraciones en la elección del PLA .....	15
2.3. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROHILADO.....	17
2.3.1. Uso de herramientas de ingeniería para la optimización continua del proceso.....	17
2.3.2. Monitoreo continuo y control del proceso.....	18
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....</b>	<b>20</b>
3.1. ETAPAS DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN .....	20
3.2. PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN POLIMÉRICA .....	21
3.3. OPERACIÓN Y USO DE MÁQUINA DE ELECTROHILADO .....	24
3.3.1. Procedimiento de uso de máquina de electrohilado .....	25
3.4. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS DE PLA .....	33
3.4.1. Caracterización por microscopía digital.....	34
3.4.2. Caracterización por microscopía electrónica de barrido.....	34
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
4.1. RESULTADOS PRELIMINARES.....	36
4.1.1. Pruebas preliminares y resultados ideales del proceso de electrohilado ...	36
4.1.2. Ensayos preliminares con soluciones poliméricas a base de PLA.....	37
4.1.3. Evaluación de resultados obtenidos de pruebas preliminares.....	47
4.1.4. Optimización y ajuste de parámetros del proceso de electrohilado.....	55
4.2. RESULTADOS FINALES .....	56
4.2.1. Proceso de electrohilado optimizado .....	56
4.2.2. Ejecución de ensayos finales de electrohilado .....	57
4.2.3. Selección de membranas obtenidas de ensayos finales.....	85
4.2.4. Caracterización de las membranas seleccionadas.....	87
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>104</b>
5.1. Morfología y entrelazamiento de las nanofibras .....	104
5.2. Diámetro de nanofibras .....	106
5.3. Separación lineal entre nanofibras .....	107
5.4. Influencia de la variación de parámetros en el proceso electrohilado.....	108
5.4.1. Influencia de la variación del voltaje .....	108

5.4.2. Influencia de la variación del caudal de inyección.....	112
5.4.3. Influencia de la variación de concentración de la solución polimérica.....	116
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>118</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>120</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>121</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

	<u>Pág.</u>
Tabla 4.1 Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 01 .....	38
Tabla 4.2 Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 02 .....	39
Tabla 4.3 Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 03 .....	40
Tabla 4.4 Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 04 .....	41
Tabla 4.5 Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 05 .....	42
Tabla 4.6 Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 06 .....	43
Tabla 4.7 Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 07 .....	44
Tabla 4.8 Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 08 .....	46
Tabla 4.9 Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 09 .....	47
Tabla 4.10 Descripción de parámetros de ensayos finales .....	58
Tabla 4.11 Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 01 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v) .....	59
Tabla 4.12 Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 02 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v) .....	60
Tabla 4.13 Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 03 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v) .....	62
Tabla 4.14 Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 04 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v) .....	63
Tabla 4.15 Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 05 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v) .....	65
Tabla 4.16 Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 06 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v) .....	66
Tabla 4.17 Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 07 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v) .....	68
Tabla 4.18 Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 08 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v) .....	69
Tabla 4.19 Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 09 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v) .....	71
Tabla 4.20 Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 01 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v) .....	72
Tabla 4.21 Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 02 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v) .....	74

Tabla 4.22	Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 03 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v) .....	75
Tabla 4.23	Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 04 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v) .....	77
Tabla 4.24	Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 05 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v) .....	78
Tabla 4.25	Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 06 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v) .....	80
Tabla 4.26	Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 07 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v) .....	81
Tabla 4.27	Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 08 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18% (p/v).....	83
Tabla 4.28	Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 09 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v) .....	84
Tabla 4.29	Ensayos finales con mejor desempeño operativo .....	87
Tabla 5.1	Descripción de morfología y entrelazamiento de nanofibras .....	105
Tabla 5.2	Diámetros de las nanofibras .....	106
Tabla 5.3	Separación lineal entre nanofibras.....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 Esquema de máquina de electrohilado .....	4
Figura 3.1 Etapas de la investigación para la obtención de membranas por electrohilado .....	21
Figura 3.2 Agitación magnética de solución polimérica a base de PLA.....	22
Figura 3.3 Frascos de vidrio con soluciones poliméricas de PLA.....	23
Figura 3.4 Máquina de electrohilado .....	24
Figura 3.5 Configuración del controlador de bombas.....	25
Figura 3.6 Colector tipo rodillo cubierto de papel aluminio .....	26
Figura 3.7 Configuración de la velocidad del colector tipo rodillo.....	26
Figura 3.8 Configuración de la velocidad de desplazamiento horizontal .....	27
Figura 3.9 Instalación de jeringa y accesorios .....	27
Figura 3.10 Instalación de aguja y conexión de manguera a jeringa .....	28
Figura 3.11 Instalación de aguja y conexión de manguera a jeringa .....	28
Figura 3.12 Conector tipo cocodrilo sobre la aguja de inyección .....	29
Figura 3.13 Cámara de máquina de electrohilado con puertas cerradas .....	29
Figura 3.14 Graduación de voltaje en elevador de tensión .....	30
Figura 3.15 Display con avance automático de la bomba de inyección.....	30
Figura 3.16 Proceso de electrohilado al interior de la cámara.....	31
Figura 3.17 Limpiador de plástico.....	31
Figura 3.18 Display que muestra la opción de detenido de la bomba de inyección.....	32
Figura 3.19 Apertura de puertas y finalización del proceso de electrohilado .....	32
Figura 3.20 Lámina de papel aluminio cubierta de membrana hecha de nanofibras.....	33
Figura 4.1 Cono de Taylor inexistente en aguja de inyección .....	38
Figura 4.2 Solución polimérica atraída en forma de gota al colector .....	39
Figura 4.3 Solución polimérica atraída en forma de hilo al colector.....	40
Figura 4.4 Formación del cono de Taylor .....	41
Figura 4.5 Solución polimérica atraída hacia el colector de rodillo .....	42
Figura 4.6 Inyección de solución polimérica y formación del cono de Taylor .....	43
Figura 4.7 Inyección y goteo de solución polimérica .....	44

Figura 4.8	Acumulación de solución polimérica.....	45
Figura 4.9	Gota de solución atraída al colector de rodillo .....	45
Figura 4.10.	Solución polimérica atraída en forma de hilo hacia el colector de rodillo.....	46
Figura 4.11	Solución polimérica inyectada y formación del cono de Taylor.....	47
Figura 4.12	Membranas obtenidas de los ensayos preliminares .....	48
Figura 4.13	Inspección táctil de la membrana.....	49
Figura 4.14	Inspección de la membrana de su permeabilidad con el agua .....	49
Figura 4.15	Inspección de la membrana de su permeabilidad con el aire.....	50
Figura 4.16	Membrana de PLA de concentración 10%(p/v) a una magnificación de 10X .....	51
Figura 4.17	Membrana de PLA de concentración 10%(p/v) a una magnificación de 40X .....	51
Figura 4.18	Membrana de PLA de concentración 10%(p/v) a una magnificación de 100X .....	52
Figura 4.19	Membrana de PLA de concentración 13%(p/v) a una magnificación de 10X .....	52
Figura 4.20	Membrana de PLA de concentración 13%(p/v) a una magnificación de 40X .....	53
Figura 4.21	Membrana de PLA de concentración 13%(p/v) a una magnificación de 100X .....	53
Figura 4.22	Membrana de PLA de concentración 18%(p/v) a una magnificación de 10X .....	54
Figura 4.23	Membrana de PLA de concentración 18%(p/v) a una magnificación de 40X .....	54
Figura 4.24	Membrana de PLA de concentración 18%(p/v) a una magnificación de 100X .....	55
Figura 4.25	Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 01.....	59
Figura 4.26	Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 02.....	61
Figura 4.27	Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 03.....	62
Figura 4.28	Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 04.....	64
Figura 4.29	Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 05.....	65

Figura 4.30 Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 06.....	67
Figura 4.31 Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 07 .....	68
Figura 4.32 Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 08.....	70
Figura 4.33 Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 09.....	71
Figura 4.34 Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 01.....	73
Figura 4.35 Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 02.....	74
Figura 4.36 Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 03.....	76
Figura 4.37 Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 04.....	77
Figura 4.38 Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 05.....	79
Figura 4.39 Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 06.....	80
Figura 4.40 Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 07 .....	82
Figura 4.41 Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 08.....	83
Figura 4.42 Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 09.....	85
Figura 4.43 Membranas obtenidas de ensayos finales y catalogadas .....	86
Figura 4.44 Estructura interna de membrana P4-13% a una magnificación de 500X.....	88
Figura 4.45 Diámetro de las nanofibras de la estructura de membrana P4-13% .....	89
Figura 4.46 Separación lineal entre nanofibras en estructura de membrana P4-13% .....	90
Figura 4.47 Morfología y entrelazamiento de las nanofibras en membrana P4-13%.....	90
Figura 4.48 Estructura interna de membrana P6-13% a una magnificación de 500X.....	91
Figura 4.49 Diámetro de las nanofibras en estructura de membrana P6-13%.....	92
Figura 4.50 Separación lineal de las nanofibras en membrana P6-13% .....	92
Figura 4.51 Morfología y entrelazamiento de las nanofibras en membrana P6-13%.....	93
Figura 4.52 Estructura interna de membrana P8-13% .....	94

Figura 4.53	Diámetro de las nanofibras de la estructura de membrana P8-13% .....	94
Figura 4.54	Separación lineal entre nanofibras en estructura de membrana P8-13% .....	95
Figura 4.55	Morfología y entrelazamiento de las nanofibras en membrana P8-13%.....	96
Figura 4.56	Estructura interna de membrana P3-18% .....	96
Figura 4.57	Diámetro de las nanofibras de la estructura de membrana P3-18% .....	97
Figura 4.58	Separación lineal entre nanofibras en estructura de membrana P3-18% .....	98
Figura 4.59	Morfología y entrelazamiento de las nanofibras en membrana P3-18%.....	98
Figura 4.60	Estructura interna de membrana P6-18% .....	99
Figura 4.61	Diámetro de las nanofibras de la estructura de membrana P6-18% .....	100
Figura 4.62	Separación lineal entre nanofibras en estructura de membrana P6-18% ....	100
Figura 4.63	Morfología de las nanofibras en membrana P6-18%.....	101
Figura 4.64	Estructura interna de membrana P9-18% .....	102
Figura 4.65	Diámetro de las nanofibras de la estructura de membrana P9-18% .....	102
Figura 4.66	Separación lineal entre nanofibras en estructura de membrana P9-18% ....	103
Figura 4.67	Trenzado helicoidal entre nanofibras de membrana P9-18%.....	103
Figura 5.1	Diámetro de nanofibras en función del voltaje en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 13%(p/v) .....	109
Figura 5.2	Diámetro de nanofibras en función del voltaje en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 18%(p/v) .....	110
Figura 5.3	Separación lineal entre nanofibras en función del voltaje en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 13%(p/v).....	111
Figura 5.4	Separación lineal entre nanofibras en función del voltaje en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 18%(p/v).....	112
Figura 5.5	Diámetro de nanofibras en función del caudal de inyección en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 13%(p/v).....	113
Figura 5.6	Diámetro de nanofibras en función del caudal de inyección en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 18%(p/v).....	114
Figura 5.7	Separación lineal entre nanofibras en función del caudal de inyección en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 13%(p/v).....	115

Figura 5.8 Separación lineal entre nanofibras en función del caudal de inyección en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 18%(p/v)..... 116



## ABREVIATURAS Y LISTAS DE SÍMBOLOS

### Abreviaturas

PLA	Ácido poliláctico (Polylactic Acid)
SEM	Microscopía electrónica de barrido (Scanning Electron Microscope).
Tg	Temperatura de transición vítrea
Tm	Temperatura de fusión
THF	Tetrahidrofurano

### Lista de símbolos

<i>p/v</i>	Relación peso respecto al volumen
<i>mm</i>	Milímetros
<i>μm</i>	Micrómetros
<i>nm</i>	Nanómetros
<i>kV</i>	Kilovoltios
<i>mL/h</i>	Mililitros por hora
<i>RPM</i>	Revoluciones por minuto
<i>mm/min</i>	Milímetros por minuto
°C	Grados centígrados

## INTRODUCCIÓN

El electrohilado es una técnica que permite la obtención de fibras a una escala nanométrica o micrométrica, por lo tanto, gracias a esta técnica es posible expandir mayores estudios en la nanotecnología, por ejemplo, en la ingeniería tisular, como menciona Persona-Báez et al. (2020).

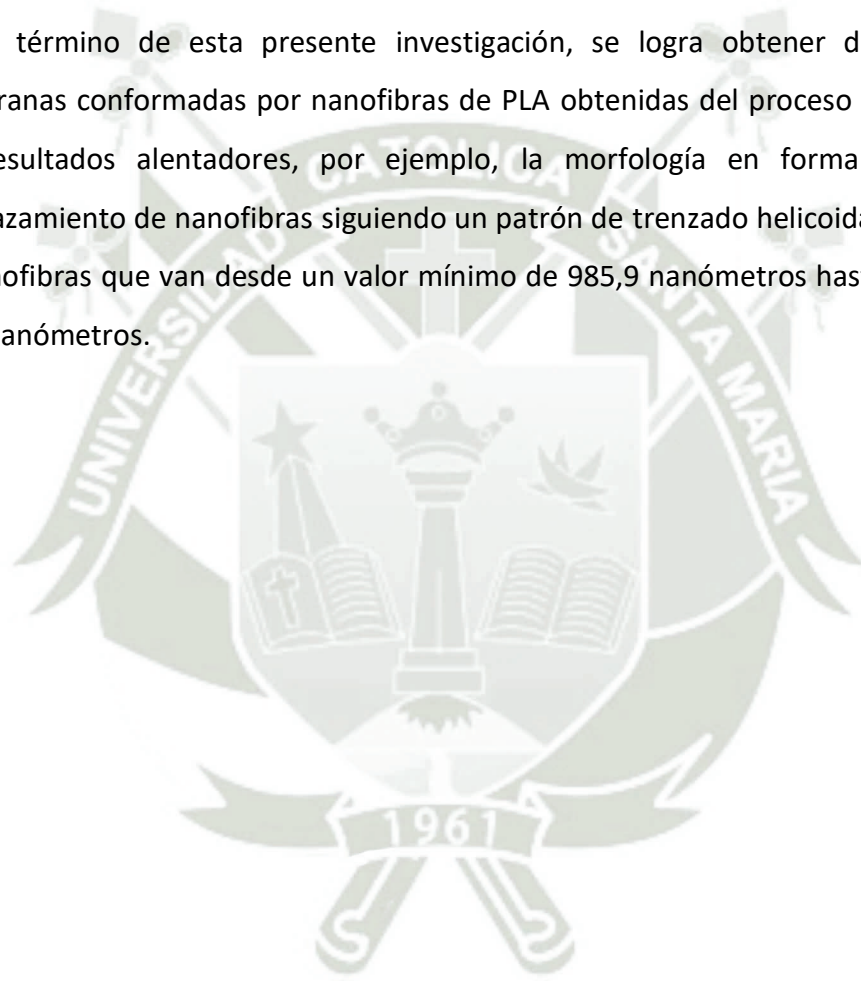
Dentro de los polímeros más utilizados a nivel global se encuentra el ácido poliláctico (PLA), cuyas características más importantes son la biocompatibilidad y la biodegradabilidad, hacen del PLA un polímero interesante para realizar aplicaciones biomédicas sin dejar de lado el aspecto medio ambiental, según indica Campozano y Riera (2022).

La presente investigación está enfocada en la obtención de membranas conformadas a partir de nanofibras de PLA mediante un proceso de electrohilado, y su posterior caracterización mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para identificar la morfología y el diámetro de las fibras que conforman las membranas.

Esta investigación presenta 5 capítulos, el primer capítulo trata sobre el marco metodológico de esta investigación donde se expone la hipótesis, los objetivos y limitaciones. El segundo capítulo esta referido al marco teórico que sirve de base bibliográfica. El tercer capítulo describe el procedimiento metodológico utilizado en la elaboración de esta investigación donde se detalla la preparación de la solución polimérica, el procedimiento de uso de la máquina de electrohilado y los métodos de caracterización a usar en esta investigación. El cuarto capítulo describe los resultados preliminares que sirven para optimizar el proceso de electrohilado y los resultados de los ensayos finales

posteriores a la optimización, donde se culmina con la caracterización de las membranas conformadas de nanofibras de PLA. Finalmente, el quinto capítulo presenta el análisis de los resultados obtenidos en el capítulo 4, donde se evalúa el comportamiento de los parámetros operativos, su influencia en el proceso de electrohilado y la relación directa que tienen respecto al diámetro de las nanofibras que conforman la estructura interna de las membranas obtenidas en los ensayos finales.

Al término de esta presente investigación, se logra obtener de forma exitosa membranas conformadas por nanofibras de PLA obtenidas del proceso de electrohilado, con resultados alentadores, por ejemplo, la morfología en forma de malla y el entrelazamiento de nanofibras siguiendo un patrón de trenzado helicoidal, con diámetros de nanofibras que van desde un valor mínimo de 985,9 nanómetros hasta un máximo de 8153 nanómetros.



## CAPÍTULO I

### 1. MARCO METODOLÓGICO

#### 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El electrohilado es una técnica moderna y eficiente que utiliza fuerzas electrostáticas para producir fibras a una escala de nanómetros hasta micrómetros, a partir de soluciones poliméricas que entregan como producto final una membrana.

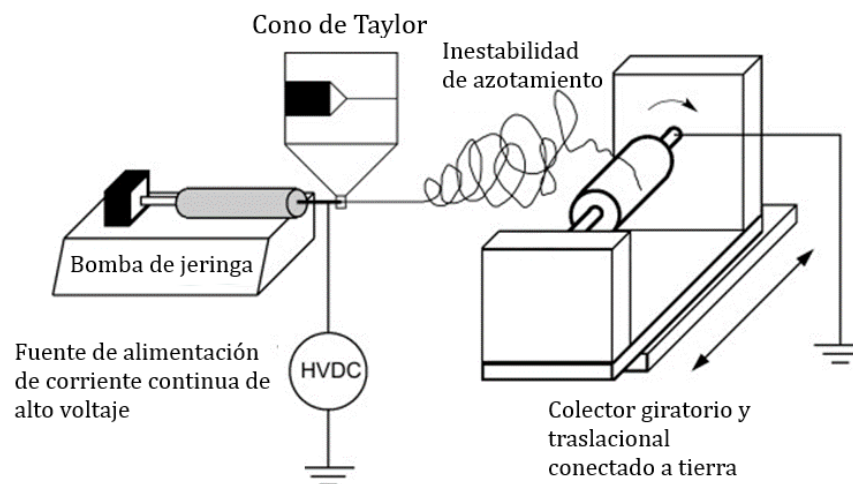
Esta técnica se lleva a cabo a través de la aplicación de un alto voltaje a una solución polimérica o fundida, y la posterior formación de un chorro de solución que se estira y se alarga por las fuerzas electrostáticas. A medida que el solvente se evapora, se forma una fibra sólida con un diámetro que puede variar desde unos pocos nanómetros hasta varios micrómetros. Las fibras resultantes tienen propiedades únicas como alta área superficial, alta relación de aspecto y alta porosidad, y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo electrónica, fotónica, tratamiento ambiental, generación y almacenamiento de energía, ingeniería biomédica e industria de la salud. El proceso de electrohilado es muy importante, y el control de los diferentes parámetros proporciona características únicas a la fibra obtenida.

La obtención de membranas elaboradas a partir de fibras en un proceso de electrohilado en el cual se utiliza una solución polimérica a base de PLA aborda diversos

problemas y condiciones, uno de ellos consiste en optimizar el proceso para generar nanofibras de PLA y se va a emplear una máquina de electrohilado con un colector de tipo rodillo como se muestra en la Figura 1.1, esto implica la precisa selección de condiciones de proceso y asegurar la estabilidad de la solución de PLA durante todo el procedimiento.

Se realiza un monitoreo continuo y evaluación del proceso de electrohilado mediante microscopía óptica, lo que permite una observación directa de las muestras y facilita la identificación de cambios necesarios en las condiciones y los parámetros operativos del proceso de electrohilado para lograr su máxima optimización, como sugiere Ribera et al. (2015).

**Figura 1.1** Esquema de máquina de electrohilado



Nota: Adaptado del esquema de Sill y Von (2008)

Otro desafío relevante es la caracterización y la evaluación de la morfología de las nanofibras de PLA producidas por electrohilado, esto implica el desarrollo y la aplicación de métodos precisos y confiables para llevar a cabo dicha tarea. De acuerdo con Sánchez (2022), la producción de nanofibras a través del método de electrohilado es afectada por los parámetros operativos del proceso, las características de la solución utilizada y los factores ambientales presentes durante su ejecución.

## 1.2. HIPÓTESIS

Es posible obtener membranas conformadas por nanofibras de PLA mediante el uso de una máquina de electrohilado, y que posteriormente éstas se puedan caracterizar mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

## 1.3. OBJETIVOS

### 1.3.1. Objetivo general

- Obtener y caracterizar membranas compuestas de nanofibras de PLA mediante un proceso de electrohilado.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Obtener nanofibras de PLA mediante electrohilado.
- Determinar el rango de parámetros óptimos para la obtención de membranas de nanofibras de PLA, a partir del análisis del cono de Taylor.
- Caracterizar la morfología y diámetro de las nanofibras de PLA a través de SEM.

## 1.4. JUSTIFICACIÓN

A continuación, se detalla los motivos y razones de esta investigación, las cuales están vistas desde 4 enfoques.

### 1.4.1. Tecnológica

La presente investigación representa un aporte importante en términos tecnológicos ya que por medio de esta podremos entender de mejor manera y de forma más precisa lo que vienen siendo las nano y microfibras, además de marcar un antecedente para posteriores investigaciones.

### 1.4.2. Social

El impacto que puede llegar a tener la realización de esta investigación recae en futuras investigaciones que basadas en la información obtenida y caracterizada, puedan redireccionar de una manera más precisa sus enfoques y así poder centrarse en aplicaciones de distintos campos como el biomédico, textil y estructural mecánico.

### 1.4.3. Ambiental

Partiendo de la premisa de que la presente investigación se desarrolla implementando una técnica prometedora como lo es el electrohilado, sumado a la elección de un polímero biodegradable como el PLA (ácido poli láctico), podemos afirmar que el impacto en temas ambientales nos dejará un saldo positivo ya que posteriores investigaciones con un enfoque totalmente direccionado podrán obtener aplicaciones que reemplacen a los plásticos no biodegradables.

### 1.4.4. Profesional

No se puede dejar de lado la justificación profesional pues se trata de un tema relativamente nuevo en el ámbito nacional y podría ser de los primeros en realizar una investigación de este tipo para un trabajo de tesis, el incentivo para la realización del presente documento es enorme ya que, al término de este, los tesisistas obtendrán el grado de Ingeniero Mecánico.

## 1.5. ALCANCES

Los alcances de esta primera investigación se describen a continuación:

- Obtención de membranas de PLA mediante proceso de electrohilado.
- Caracterización de nanofibras de PLA mediante SEM.

## 1.6. LIMITACIONES

- Se limitará a realizar la caracterización morfológica y dimensional de las nanofibras de PLA, debido a la ausencia de mayores equipos y tipos de ensayo disponibles en la Universidad y en el área de investigación local.
- Se realizará una cantidad determinada de pruebas debido a la innumerable variación de parámetros operativos posibles.
- Las limitaciones tienen alcance en la elección de material, se elige PLA debido a la disponibilidad en el mercado.

## 1.7. ANTECEDENTES

En el medio local no se encuentran mayores alcances que los de fabricación de máquinas de electrohilado, debido a esto la investigación toma como antecedentes bibliografía extranjera que se citará según corresponda para poder proceder con la misma.



## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ELECTROHILADO

El electrohilado se define como una técnica de fabricación de fibras que emplea fuerzas eléctricas para estirar hilos cargados provenientes de soluciones de polímeros o polímeros fundidos, cuyo proceso logra obtener diámetros de fibra en el rango de nanómetros hasta los micrómetros.

Diversos factores, como el voltaje aplicado, la tensión superficial, la conductividad eléctrica, el peso molecular del polímero y la volatilidad del solvente influyen en la morfología y estructuración de las nanofibras. La manipulación precisa de estos factores confiere propiedades únicas a las fibras producidas por electrohilado, resaltando la importancia del control durante el proceso. Cabe destacar que los parámetros de disolución varían según la combinación específica de polímero y solvente utilizados, según menciona Molfino et al. (2020).

En las últimas décadas, la aplicación más común de la técnica de electrohilado ha sido la creación de "scaffolds" o andamios celulares en el ámbito de la ingeniería de tejidos. El aumento de nuevos biomateriales obtenidos mediante electrohilado ha generado diversas aplicaciones derivadas de sus propiedades singulares, como la elevada relación de la

superficie respecto al volumen, la porosidad, las propiedades fisicoquímicas y la versatilidad de la técnica para el desarrollo de microfibras, como indica Molfino et al. (2020).

De acuerdo con Molfino et al. (2020), el diámetro de las fibras producidas por electrohilado está intrínsecamente vinculado a los parámetros de la solución, siendo críticos la concentración, viscosidad, conductividad de la solución polimérica, así como los efectos dieléctricos del solvente; a estos se suman las variables inherentes al proceso mismo.

### **2.1.1. Principios electro hidrodinámicos**

El electrohilado es una técnica avanzada para la generación de fibras, haciendo uso de fuerzas eléctricas para producir hilos cargados a partir de soluciones poliméricas o polímeros en estado fundido, resultando en diámetros de fibra en la escala de cientos de nanómetros. La conformación de las nanofibras se ve influenciada por diversos factores como el voltaje aplicado, la tensión superficial, la conductividad eléctrica, el peso molecular del polímero y la volatilidad del solvente, según menciona Molfino et al. (2020).

Esta metodología ha encontrado aplicaciones destacadas en campos como la ingeniería de tejidos, la administración controlada de fármacos y la purificación de aire y agua, como indican Contreras et al. (2023) y Molfino et al. (2020).

Los componentes esenciales de un sistema de electrohilado comprenden una fuente de alto voltaje, una aguja especializada, un recolector y una solución polimérica, como señala Contreras et al. (2023). Para facilitar la formación del cono de Taylor y la producción de fibras, la solución polimérica utilizada debe poseer una conductividad eléctrica suficiente. Dicha conductividad está determinada por la concentración del polímero, la temperatura y la presencia de aditivos conductores. Asimismo, la viscosidad de la solución polimérica debe ser ajustada para permitir la formación del cono de Taylor y la producción de fibras, siendo esta viscosidad afectada por la concentración de la solución, la temperatura y la introducción de aditivos viscosificantes, según indica Molfino et al. (2020).

### a) Análisis de fuerzas electro hidrodinámicas

El estudio de las fuerzas electro hidrodinámicas en el proceso de electrohilado con PLA es esencial para comprender la formación de las fibras y para optimizar los parámetros de deposición con el fin de obtener fibras que posean las propiedades deseadas. A continuación, se detalla brevemente cada una de las fuerzas involucradas en este análisis:

**Fuerza eléctrica:** Esta fuerza, primordial en la formación del cono de Taylor, actúa sobre la solución de polímero debido a la interacción entre las cargas eléctricas presentes en la solución y el campo eléctrico aplicado.

**Fuerza de Coulomb:** Es la fuerza que opera entre las cargas eléctricas en la solución de polímero y la aguja de electrohilado. Su magnitud es proporcional al producto de las cargas eléctricas e inversamente proporcional a la distancia entre ellas.

**Fuerza de repulsión electrostática:** Esta fuerza impide que las cargas eléctricas en la solución de polímero se acumulen en un solo punto, manteniendo una distribución uniforme.

**Fuerza de tensión superficial:** Actúa en la superficie de la solución de polímero, evitando que esta se rompa en gotas y contribuyendo a la formación de fibras continuas.

**Fuerza de viscosidad:** Opera en la solución de polímero y evita que la solución se estire excesivamente, previniendo la ruptura.

El diámetro de las fibras obtenidas por electrohilado está influenciado por parámetros de solución clave, tales como la concentración, viscosidad, conductividad de la solución polimérica y los efectos dieléctricos del solvente. La porosidad de las fibras puede ser ajustada mediante la selección y control de los parámetros de solución y proceso, de acuerdo con lo mencionado por Sánchez (2022). Para mejorar la resistencia a la tracción y elasticidad de las fibras, se puede optar por la selección cuidadosa de polímeros y la optimización de los parámetros de proceso, como sugiere Calzón (2016).

El análisis de las fuerzas electro hidrodinámicas resulta crucial para la optimización de los parámetros de deposición en la concepción de recubrimientos nanoestructurados con aplicaciones biomédicas, como indica Molfino et al. (2020).

#### **b) Ingeniería de procesos para obtener propiedades mecánicas deseadas**

Para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas en el proceso de electrohilado con PLA, se pueden seguir las siguientes etapas:

**Elección de materiales:** Según Espinoza (2016), la selección de materiales es crucial en el proceso de electrohilado. El PLA, un polímero biodegradable y biocompatible, es comúnmente empleado en aplicaciones médicas e ingeniería de tejidos debido a sus características mecánicas y biológicas. De acuerdo con Arroyave (2020), es posible mejorar las propiedades mecánicas del PLA al agregar materiales, al no ser este el caso, se trabaja únicamente con PLA.

**Preparación de la solución polimérica:** La solución se elabora disolviendo el PLA en un solvente adecuado, por ejemplo, el cloroformo o tetrahidrofurano (THF), como menciona Espinoza (2016). La concentración de la solución de polímero y la proporción entre el polímero y el solvente son factores críticos que influyen en las características y propiedades de las fibras electrohiladas, según refiere Arroyave (2020). En el caso de esta investigación, se elige el cloroformo como solvente y se selecciona concentraciones diferentes con el objetivo de encontrar parámetros operativos y resultados cercanos a lo ideal en el proceso de obtención de membranas de PLA.

**Electrohilado:** Según Espinoza (2016), este proceso implica la extrusión de la solución de polímero a través de una aguja cargada eléctricamente para formar fibras ultrafinas. Los aspectos como la distancia entre la aguja y el colector, la velocidad de rotación del colector y la tasa de flujo de la solución de polímero también afectan las propiedades mecánicas de las fibras electrohiladas, como indican Roa (2017), Arroyave (2020) y Diaz (2015).

**Tratamiento post-electrohilado:** Para mejorar las propiedades mecánicas de las fibras electrohiladas, se emplea un tratamiento post-electrohilado, como el tratamiento térmico

o de vapor, como sugiere Espinoza (2016). El tratamiento térmico optimiza la cristalinidad del PLA, mientras que el tratamiento de vapor mejora la porosidad de las fibras, como indica Domínguez (2021).

Es esencial considerar que estos pasos pueden variar según la aplicación específica de las fibras electrohiladas, en esta investigación no haremos uso de un tratamiento post-electrohilado ya que el objetivo principal es la caracterización de las fibras para identificar la morfología y el diámetro de éstas.

### **2.1.2. Diseño y control del proceso de electrohilado para la obtención de membranas**

#### **a) Estrategias de ingeniería para ajustar parámetros operativos**

Las estrategias de ingeniería para realizar el ajuste de óptimos parámetros operativos para la obtención de membranas mediante electrohilado, pueden variar según el contexto de aplicación. A continuación, se mencionan algunas estrategias altamente usadas para realizar estos ajustes.

**Identificación de las características del proceso:** Es un paso fundamental donde es crucial definir los parámetros y establecer estrategias de control para el proceso de electrohilado, como indican Dávila y Tobacia (2016). Este enfoque permite la determinación de los parámetros operativos óptimos para el proceso de electrohilado.

**Optimización de los parámetros del proceso:** Abarca aspectos como la velocidad de rotación del colector de tipo rodillo, la distancia entre la aguja y el rodillo, el caudal de inyección de la solución y la concentración de dicha solución, como menciona Meluci (2022). La mejora de estos parámetros contribuye a la uniformidad y una mayor calidad de las fibras electrohiladas.

**Configuración del proceso de electrohilado:** La distancia entre la aguja y el rodillo, la velocidad de rotación del rodillo y el caudal de inyección de la solución ejercen también una influencia significativa en las propiedades mecánicas de las fibras electrohiladas.

Ajustar estos parámetros de manera adecuada y precisa resulta crucial para obtener fibras que sean uniformes y de alta calidad.

Es imperativo destacar que los parámetros operativos para el proceso de electrohilado se deben ajustar cuidadosamente para garantizar la obtención de fibras electrohiladas uniformes y de alta calidad. Además, se debe considerar factores como la identificación de las características del proceso, la optimización de los parámetros del proceso, la configuración del electrohilado y la implementación de un sistema de control automático.

En la búsqueda de bibliografía que contenga información detallada acerca de los parámetros ideales para la obtención de membranas de PLA se inicia con una preparación de la solución polimérica a un porcentaje de 13%, también se observa que trabaja con 20 kV en la fuente de alimentación y un caudal de inyección de 3 mL/h para una aguja de 0,6 mm de diámetro, como sugiere Persona-Báez et al. (2020). Estos datos son el punto de partida para el ajuste de parámetros operativos de la máquina y posterior obtención de las membranas.

## **2.2. CARACTERÍSTICAS Y ADAPTABILIDAD DEL PLA**

Las características de termoplaticidad y biodegradabilidad como dos principales características del PLA se puede identificar que este polímero ofrece una variedad de propiedades desde su estado amorfo hasta cristalino. La pureza estereoquímica del PLA impacta su estructura cristalina y propiedades, con un punto de fusión alrededor de 180 °C para el PLA altamente puro.

El PLA muestra baja solubilidad en varios solventes, lo que lo hace seguro para su uso. Además, se ha demostrado que tiene propiedades de barrera preferenciales para gases como nitrógeno, dióxido de carbono y metano, siendo una opción robusta y biodegradable para reemplazar películas plásticas petroquímicas.

Aunque el PLA posee buenas propiedades biocompatibles y de estiramiento, se exploran mejoras, como la hidrofobicidad, mediante métodos efectivos. La incorporación

de aditivos modificados y la formación de nanocompuestos se han investigado para mejorar las propiedades del PLA.

Según Campozano y Riera (2022), el control de la cristalinidad del PLA es crucial tanto para su temperatura de utilidad como para su tiempo de degradación, que varía de 6 meses a 2 años en el medio ambiente, dependiendo de factores como tamaño, forma, isomería y temperatura del artículo

### **2.2.1. Análisis de las propiedades del PLA**

El ácido poliláctico (PLA) es un biopolímero termoplástico que presenta una estructura molecular única que le otorga propiedades químicas, físicas y térmicas específicas. Estas características tienen un impacto considerable en la ingeniería de materiales, especialmente en campos como las aplicaciones biomédicas y de envasado. A continuación, se detalla lo más significativo de sus propiedades.

#### **a) Estructura molecular del PLA**

El PLA se encuentra fácilmente disponible en el mercado, lo que simplifica su adquisición y resulta ventajoso para la investigación y desarrollo en electrohilado. La accesibilidad a gran escala de este biopolímero posibilita su aplicación en una variedad de proyectos y usos.

#### **b) Propiedades químicas del PLA**

Biodegradable y biocompatible, estas características hacen del PLA un polímero apto para aplicaciones biomédicas. Además, presenta propiedades de barrera al agua y al dióxido de carbono, lo que lo convierte en un material de envasado atractivo, aunque su barrera al oxígeno es ligeramente menos efectiva.

#### **c) Propiedades mecánicas del PLA**

Aunque el PLA comparte propiedades mecánicas similares con los polímeros petroquímicos, su elongación es reducida. Esta característica puede ajustarse durante la polimerización o mediante modificaciones posteriores, como la adición de plastificantes.

#### **d) Propiedades térmicas del PLA**

Con una temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de alrededor de 60-65 °C y una temperatura de fusión ( $T_m$ ) de aproximadamente 170-180 °C, las propiedades térmicas del PLA afectan su procesabilidad y estabilidad.

El impacto del electrohilado en la ingeniería de materiales viene siendo prometedor ya que ha demostrado gran avance en aplicaciones biomédicas y de envasado debido a su estructura molecular y sus propiedades químicas, físicas y térmicas. Su biodegradabilidad y biocompatibilidad lo posicionan como una alternativa sostenible a los polímeros petroquímicos en diversas aplicaciones.

### **2.2.2. Consideraciones en la elección del PLA**

#### **a) Disponibilidad en el mercado**

El PLA es ampliamente accesible en el mercado. Su disponibilidad a escala comercial facilita su adquisición, lo que resulta beneficioso para la investigación y desarrollo del electrohilado. La facilidad para obtener este biopolímero permite su uso en diversas aplicaciones y proyectos.

#### **b) Biodegradable y sostenible**

El PLA, un biopolímero obtenido de fuentes renovables como el almidón de maíz o la caña de azúcar, es atractivo debido a su origen biodegradable y sostenible. Este aspecto lo convierte en una elección destacada y atractiva para su uso en esta investigación ya que la sostenibilidad y la minimización del impacto ambiental son aspectos fundamentales, especialmente en un contexto actual en el que la conciencia ambiental está en constante aumento.

#### **c) Compatibilidad con disolventes comunes**

El PLA exhibe compatibilidad con varios disolventes comunes utilizados en procesos de electrohilado, como el cloroformo o tetrahidrofurano (THF). Esta característica facilita la preparación de soluciones a base de PLA para el proceso de electrohilado, ya que el acceso a disolventes como el cloroformo no presentan restricciones estrictas para su

adquisición, proporcionando flexibilidad en la elección de disolventes según los requisitos específicos del proyecto.

**d) Versatilidad y ajuste de propiedades**

El PLA exhibe versatilidad y la capacidad de modificar sus propiedades al seleccionar entre diferentes estereoisómeros (L, D, o DL), lo que incide en la estructura y, por consiguiente, en las propiedades del producto final. Esta flexibilidad posibilita ajustar las características del PLA de acuerdo con los requisitos específicos de las aplicaciones en el proceso de electrohilado. Al tratarse de primeros ensayos de obtención de membranas por electrohilado, la elección de PLA se hará por la disponibilidad actual del mercado.

**e) Aplicaciones biomédicas y de envasado**

El PLA es ampliamente utilizado en aplicaciones biomédicas, como suturas, implantes y liberación controlada de fármacos. Además, sus propiedades de barrera lo hacen atractivo en aplicaciones de envasado. La versatilidad del PLA lo convierte en una opción atractiva ya que este primer ensayo representa un gran precedente para posteriores investigaciones.

**f) Efectos positivos en el entorno**

La biodegradabilidad del PLA, junto con su obtención a partir de recursos renovables, contribuye a la reducción de residuos plásticos y al impacto ambiental. Utilizar PLA en electrohilado alinea los procesos de fabricación con consideraciones medioambientales.

**g) Aprobaciones regulatorias**

El PLA ha sido aprobado por diversas agencias reguladoras para su uso en aplicaciones médicas y de envasado. Esto proporciona una base sólida para la confianza en su seguridad y conformidad con los estándares de calidad, factores esenciales al seleccionar materiales para electrohilado.

En resumen, la justificación del PLA como material para realizar los ensayos de electrohilado se fundamenta en su disponibilidad en el mercado, compatibilidad con disolventes, sostenibilidad, versatilidad, aplicaciones diversas y su contribución positiva al

entorno, respaldada por aprobaciones regulatorias. Estas características hacen del PLA una elección sólida y prometedora para proyectos de electrohilado en diversos campos de aplicación.

### **2.3. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROHILADO**

La selección de parámetros mediante el método experimental de prueba y error se justifica plenamente debido a que se trabaja con una máquina nueva. Dada la novedad del equipo, carecemos de datos históricos o pautas establecidas que guíen la configuración de los parámetros operativos para obtener un proceso y resultados de buena calidad. En este contexto, el enfoque experimental se convierte en una herramienta esencial para explorar y determinar los valores óptimos.

Este método posibilita una adaptación dinámica a las particularidades de la máquina, considerando que cada equipo puede tener variaciones sutiles y características únicas. La prueba y error ofrece la flexibilidad necesaria para ajustar y optimizar los parámetros de acuerdo con las respuestas específicas que observamos durante los ensayos preliminares. Además, permite comprender de manera más profunda la interacción entre los diversos factores y cómo influyen directamente en el proceso.

Es crucial destacar que este enfoque experimental no solo proporciona información valiosa sobre los parámetros óptimos para la máquina en cuestión, sino que también contribuye a la acumulación de conocimientos que resulten útiles para los siguientes ajustes y mejoras en el proceso de obtención de membranas. En última instancia, esta estrategia establece una base sólida para la optimización continua a medida que adquirimos experiencia con la nueva máquina.

#### **2.3.1. Uso de herramientas de ingeniería para la optimización continua del proceso**

La implementación de balanzas digitales de alta precisión y pipetas graduadas, en el proceso de disolución de PLA en cloroformo con concentraciones específicas de 10% (p/v), 13%(p/v) y 18%(p/v), se justifica por la necesidad de garantizar la reproducibilidad y

consistencia en la preparación de las soluciones precursoras. Las balanzas digitales desempeñan un papel fundamental al medir con exactitud las cantidades específicas de PLA y cloroformo, asegurando la proporción adecuada de los componentes y la uniformidad en cada lote de solución. Esta precisión es crítica para el éxito del proceso de electrohilado, donde incluso pequeñas variaciones en la concentración pueden tener un impacto significativo en las propiedades finales de las nanofibras.

Adicionalmente, el uso de pipetas graduadas tiene un papel crucial al garantizar la dosificación precisa de los componentes que conforman la solución polimérica. Un correcto uso de las pipetas graduadas asegura que las cantidades específicas de cada componente sean exactas, y así minimizar las variaciones en la concentración y mejorar la consistencia del proceso. Este nivel de precisión es esencial para la reproducibilidad del proceso de electrohilado, ya que la uniformidad en la dosificación contribuye directamente a la calidad y funcionalidad de las fibras resultantes en el proceso de electrohilado.

Finalmente, el agitador magnético desempeña un papel crucial en la disolución y homogeneización efectiva de las soluciones, esto contribuye a la obtención de mezclas uniformes y elimina posibles gradientes de concentración. La acción constante y controlada del agitador magnético asegura que los componentes se dispersen de manera completa, optimizando así la interacción molecular entre PLA y cloroformo. Esta homogeneidad resulta esencial para obtener soluciones consistentes, un requisito fundamental para el éxito del proceso de electrohilado.

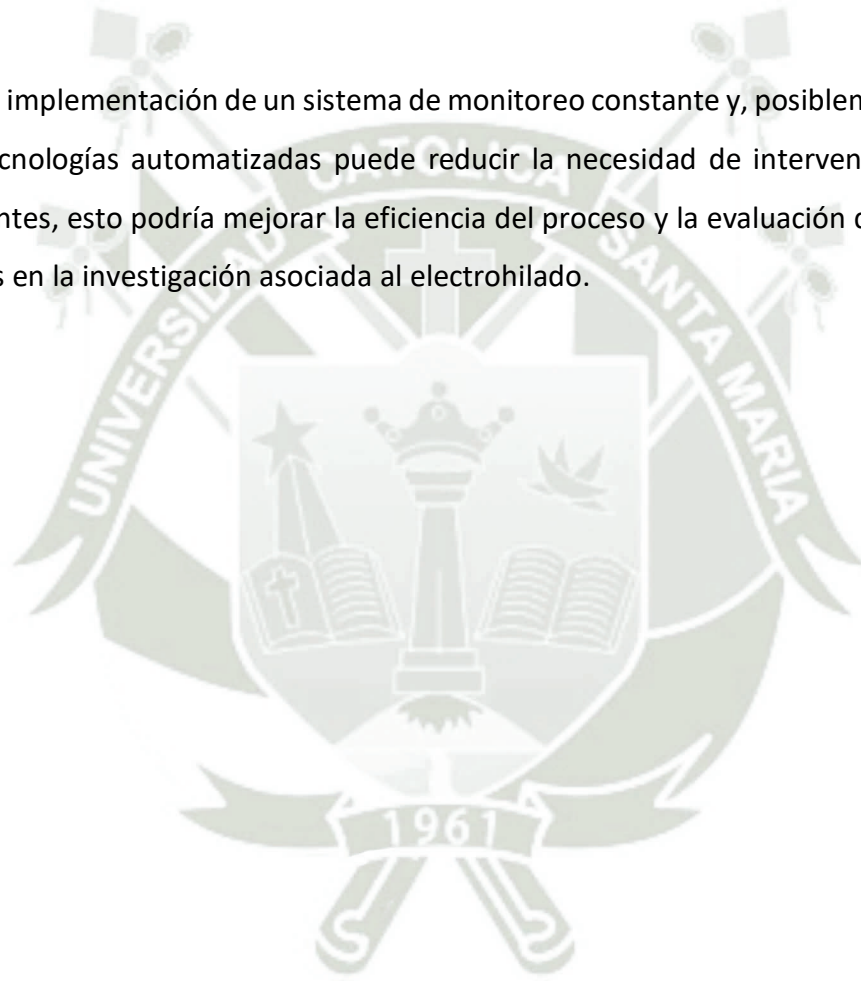
### **2.3.2. Monitoreo continuo y control del proceso**

La necesidad de un control constante en la inyección de la solución polimérica en la máquina de electrohilado se justifica debido a la acumulación periódica de material en la boquilla de la aguja de inyección. Este fenómeno, que requiere asistencia manual, tiene implicaciones directas en la continuidad y la calidad del proceso. La acumulación de material en la boquilla puede resultar en interrupciones no programadas, en consecuencia, afectar la uniformidad de las fibras electrohiladas. Por lo tanto, el control constante del

proceso es esencial para evitar estas obstrucciones y garantizar un funcionamiento óptimo y eficiente.

Además, es crucial reconocer la naturaleza de este control debido a que los ensayos tienen una duración promedio de 3 horas. La intervención manual periódica, además de interrumpir el flujo de trabajo, agrega una carga adicional a la operación y puede impactar la productividad general y la calidad del proceso de electrohilado.

La implementación de un sistema de monitoreo constante y, posiblemente, la limpieza con tecnologías automatizadas puede reducir la necesidad de intervenciones manuales frecuentes, esto podría mejorar la eficiencia del proceso y la evaluación de otros aspectos críticos en la investigación asociada al electrohilado.



## CAPÍTULO III

### 3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

#### 3.1. ETAPAS DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación está enfocada en la obtención de membranas poliméricas a partir de nanofibras de PLA, por lo tanto, se establecen cuatro principales etapas secuenciales que vinculan la terminación de cada una para el desarrollo de la siguiente. A continuación, se detalla estas etapas esquematizadas de forma secuencial en la Figura 3.1.

**Estudio del arte sobre electrohilado y PLA:** Esta etapa se enfoca en estudiar los antecedentes sobre el proceso de electrohilado, las características más representativas del ácido poliláctico y como diluir dicho polímero para su posterior uso en el proceso de electrohilado.

**Preparación de solución polimérica a base de PLA:** En esta etapa se realiza el proceso de dilución de PLA en cloroformo, según lo investigado en la etapa previa, con el fin de usar esta solución en el proceso de electrohilado.

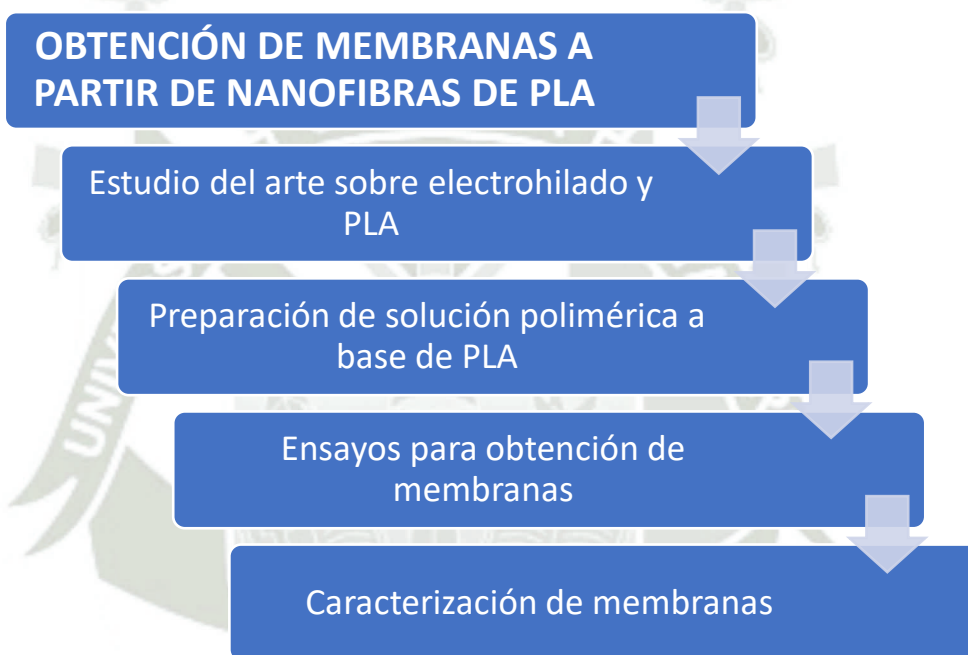
**Ensayos para obtención de membranas:** Esta etapa de la investigación se subdivide en:

- Ensayos preliminares para el ajuste y optimización de parámetros operativos de la máquina de electrohilado.

- Ensayos finales para la obtención de membranas.

**Caracterización de membranas:** En esta etapa se caracteriza las membranas obtenidas en los ensayos finales, mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), que proporciona imágenes que sirven para evaluar la morfología y el diámetro de las fibras que conforman la estructura interna de las membranas.

**Figura 3.1** Etapas de la investigación para la obtención de membranas por electrohilado



### 3.2. PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN POLIMÉRICA

Según Persona-Báez et al. (2020), el proceso para la obtención de una solución polimérica a base de PLA consiste en diluir PLA en cloroformo.

En esta investigación se va a trabajar con 3 soluciones poliméricas a base de PLA a 3 diferentes concentraciones de 10%(p/v), 13%(p/v). y 18 % (p/v) respectivamente, esto comprende diluir 10, 13 y 18 gramos de PLA respectivamente en 100 mL de cloroformo, como indica Skoog et al. (2014).

Para llevar a cabo el proceso de dilución de PLA, a una concentración específica, en cloroformo se realizan los siguientes pasos de forma secuencial:

- Realizar el pesaje de PLA en una balanza electrónica.
- Lavar, limpiar y dejar secar la pipeta graduada y el frasco autoclavable.
- Medir 100 mL de cloroformo en la pipeta graduada.
- Verter el cloroformo y el PLA en el frasco autoclavable y tapar el frasco.
- Posicionar el frasco autoclavable sobre el agitador magnético.
- Iniciar el proceso de agitación magnética durante el tiempo y condiciones operativas de agitación preestablecidas.

Según Persona-Báez et al. (2020), para el proceso de dilución de PLA en cloroformo a una concentración específica, ya sea una concentración de 10%, 13% o 18 % (p/v), se debe mantener en agitación magnética la solución contenida en el frasco autoclavable a 500 RPM durante 120 minutos a una temperatura ambiente que oscile entre 20 °C y 24 °C, como se puede observar en la Figura 3.2.

**Figura 3.2** Agitación magnética de solución polimérica a base de PLA



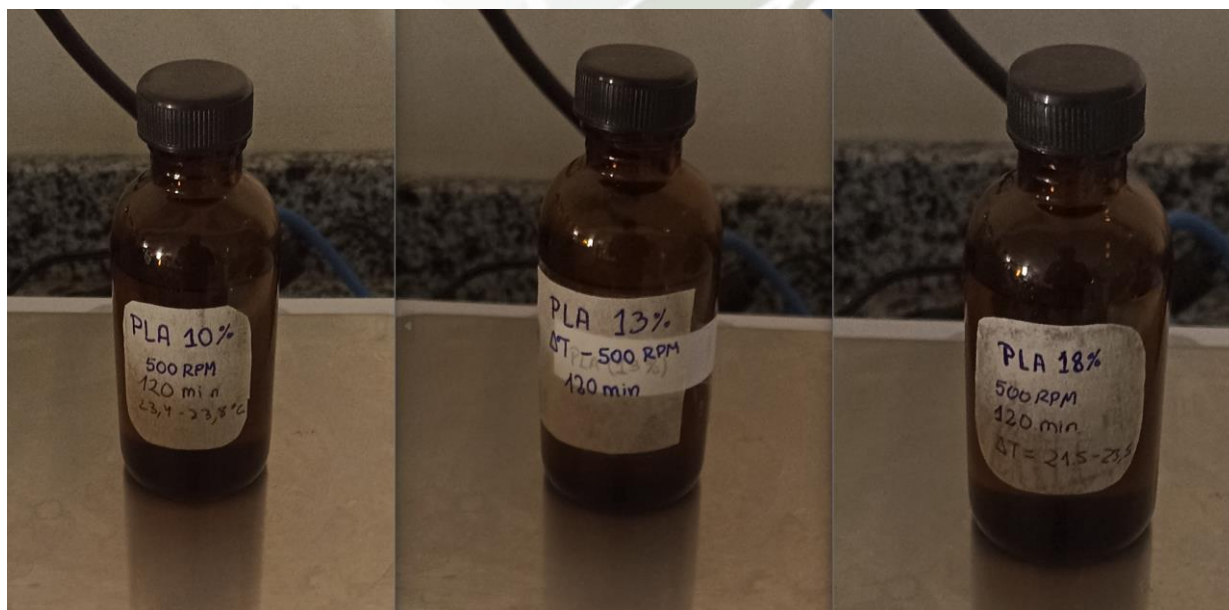
Posteriormente, cuando el PLA se haya diluido en su totalidad se añade a la solución contenida en el frasco, 2 mL de etanol con una pureza del 95%, como sugiere Persona-Báez et al. (2020). Por lo tanto, para mezclar el etanol con la solución polimérica debemos seguir los siguientes pasos:

- Medir 2 mL de etanol en una jeringa limpia.
- Destapar el frasco autoclavable.
- Verter los 2 mL de etanol en el frasco.
- Tapar el frasco autoclavable.

Al finalizar los pasos previos, para mezclar el etanol en la solución polimérica se posiciona nuevamente el frasco sobre el agitador magnético y se mantiene la solución en agitación magnética a 500 RPM durante 5 minutos a una temperatura ambiente que oscile entre 20 °C y 24 °C.

Finalizado el proceso de agitación, se vierte y almacena la solución polimérica en un frasco de vidrio, limpio de impurezas, y se etiqueta con la concentración específica que contiene y los parámetros de agitación de dicha solución como se puede observar en la Figura 3.3.

**Figura 3.3** Frascos de vidrio con soluciones poliméricas de PLA



### 3.3. OPERACIÓN Y USO DE MÁQUINA DE ELECTROHILADO

El proceso de electrohilado cuyo objetivo final es la obtención de membranas de PLA, tiene como base hacer uso de la máquina de electrohilado y trabajar correctamente con sus diversos parámetros operativos, por lo tanto, en la Figura 3.4. se muestra una foto general de dicha máquina y a continuación se detallan los parámetros operativos que se pueden modificar en la ejecución del proceso de electrohilado:

- Voltaje.
- Caudal.
- Distancia y ángulo de inyección.
- Calibre de aguja de inyección.
- Velocidad de rotación del colector tipo rodillo.
- Desplazamiento horizontal de jeringa.
- Temperatura.
- Ventilación.

**Figura 3.4** Máquina de electrohilado



### 3.3.1. Procedimiento de uso de máquina de electrohilado

Así mismo, conociendo las características de la máquina de electrohilado, se debe ejecutar su operación. A continuación, se describe un instructivo que contiene el paso a paso para hacer uso de la máquina y de esta forma obtener las membranas de PLA:

**Paso 01:** Conectar la máquina de electrohilado, el elevador de potencia y el controlador de las bombas de inyección a la fuente de alimentación.

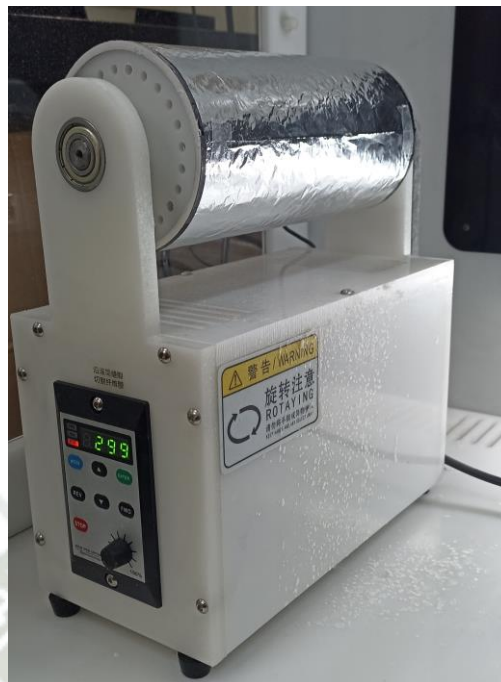
**Paso 02:** Encender el dispositivo controlador de las bombas inyectoras que permite establecer el caudal de inyección como se observa en la Figura 3.5. En éste se debe modificar la distancia a recorrer por la bomba inyectora, así como seleccionar la bomba con la que se va a trabajar en la prueba.

**Figura 3.5** Configuración del controlador de bombas



**Paso 03:** Cortar una lámina de papel aluminio cuya medida es acorde al ancho del colector tipo rodillo. Posteriormente cubrir el rodillo con dicha lámina como se observa en la Figura 3.6.

**Figura 3.6** Colector tipo rodillo cubierto de papel aluminio



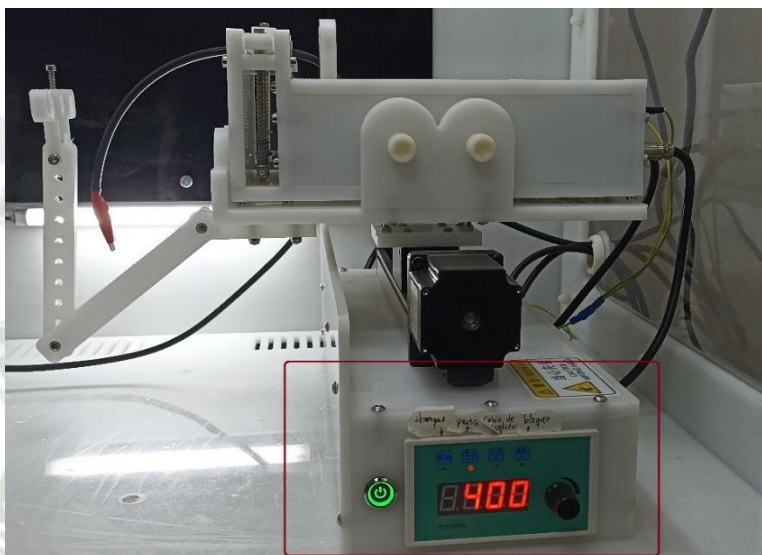
**Paso 04:** Establecer la velocidad de giro (RPM) del colector tipo rodillo como se observa en la Figura 3.7.

**Figura 3.7** Configuración de la velocidad del colector tipo rodillo



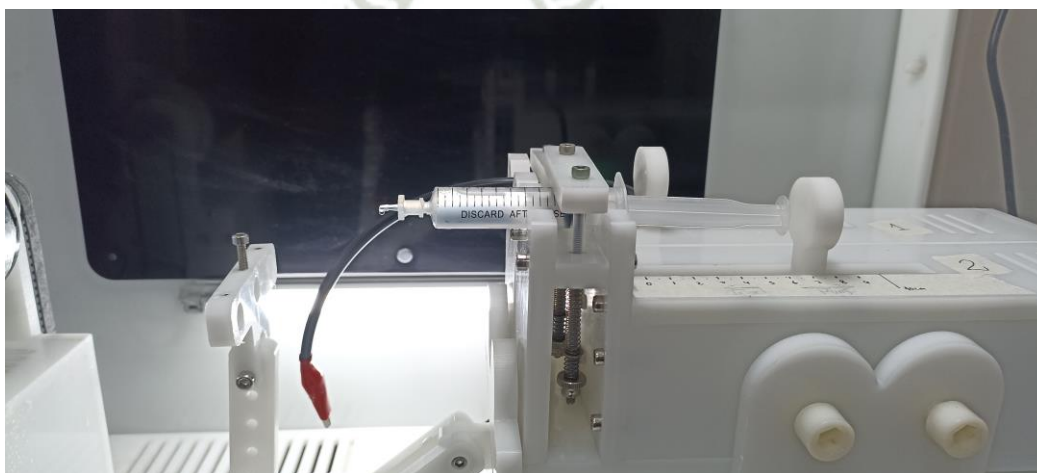
**Paso 05:** Establecer la velocidad de avance del tornillo sin fin que permitirá el desplazamiento horizontal de la jeringa de inyección como se observa en la Figura 3.8.

**Figura 3.8** Configuración de la velocidad de desplazamiento horizontal



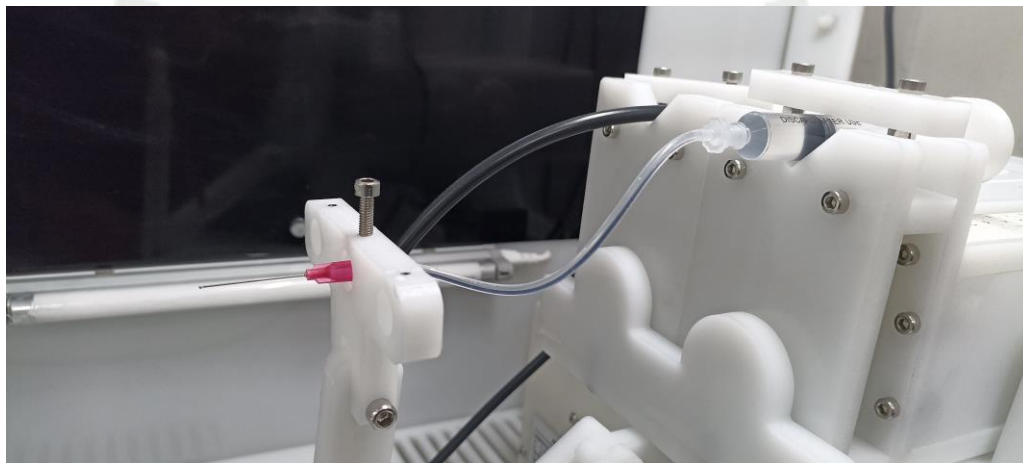
**Paso 06:** Llenar la jeringa con la solución polimérica de acuerdo con el volumen que se planea ensayar. Luego instalar en la boquilla de la jeringa el adaptador para conectar la manguera y finalmente instalar la jeringa sobre la bomba de inyección previamente seleccionada como se observa en la Figura 3.9.

**Figura 3.9** Instalación de jeringa y accesorios



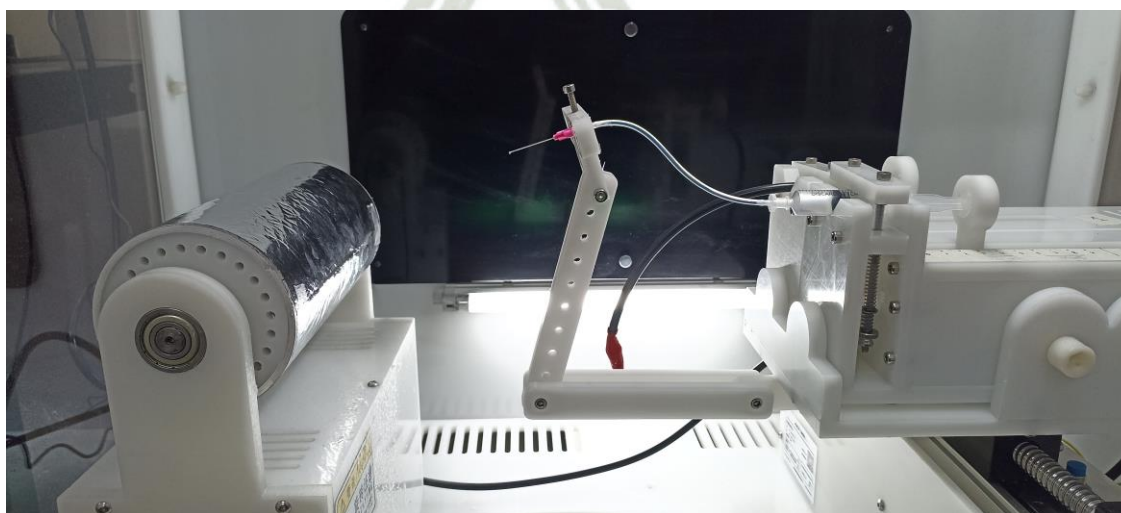
**Paso 07:** Elegir el calibre de aguja a utilizar e instalar en la aguja el adaptador para conectar la manguera, luego se debe cortar la cantidad de manguera a utilizar y conectar el adaptador de la aguja a uno de los extremos de la manguera. Finalmente instalar la aguja sobre el pedestal de posicionamiento y conectar el otro extremo libre de la manguera al adaptador de la jeringa como se observa en la Figura 3.10.

**Figura 3.10** Instalación de aguja y conexión de manguera a jeringa



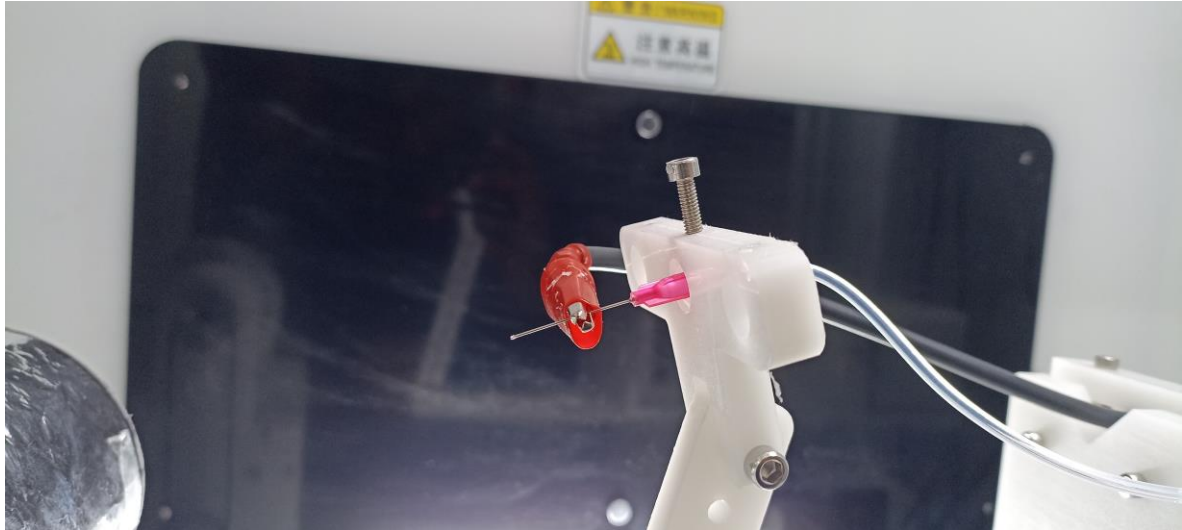
**Paso 08:** Establecer el ángulo en el que la jeringa inyectará la solución sobre el colector tipo rodillo y establecer la distancia entre la aguja y el colector como se observa en la Figura 3.11.

**Figura 3.11** Instalación de aguja y conexión de manguera a jeringa



**Paso 09:** Instalar el conector tipo cocodrilo sobre la aguja de la jeringa como se observa en la Figura 3.12.

**Figura 3.12** Conector tipo cocodrilo sobre la aguja de inyección



**Paso 10:** Iniciar el sistema de rotación del colector tipo rodillo, luego iniciar sistema de desplazamiento lateral (tornillo sin fin), finalmente cerrar las puertas de la cámara como se observa en la Figura 3.13.

**Figura 3.13** Cámara de máquina de electrohilado con puertas cerradas

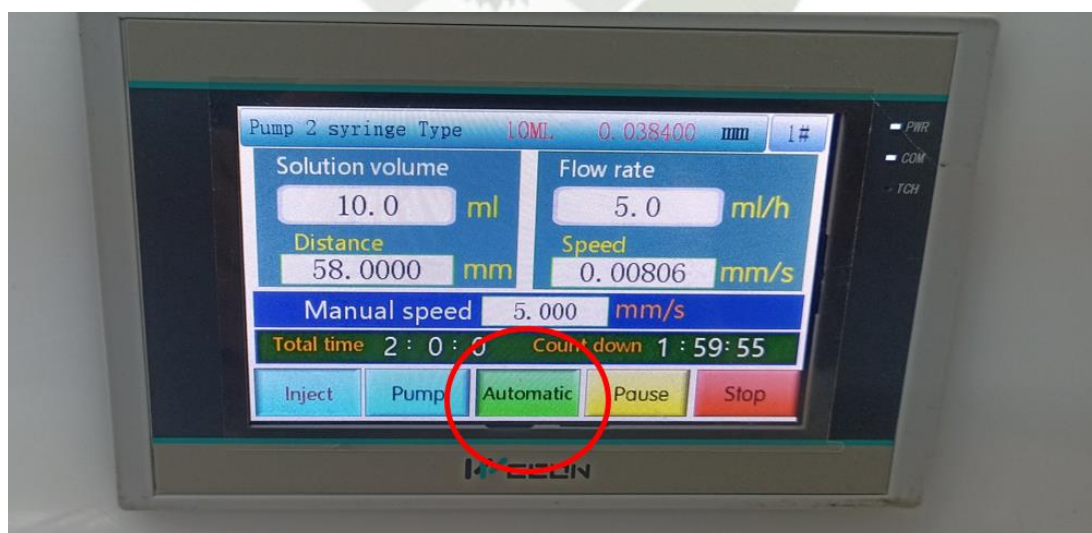


**Paso 11:** Encender el elevador de tensión, graduar el voltaje definido para el ensayo con la perilla en el exterior del equipo y observar el nivel de tensión en el display del elevador, tener en cuenta que la unidad está en kV, luego iniciar con el avance automático de las bombas de inyección previamente seleccionada como se observa en la Figura 3.14 y 3.15.

**Figura 3.14** Graduación de voltaje en elevador de tensión

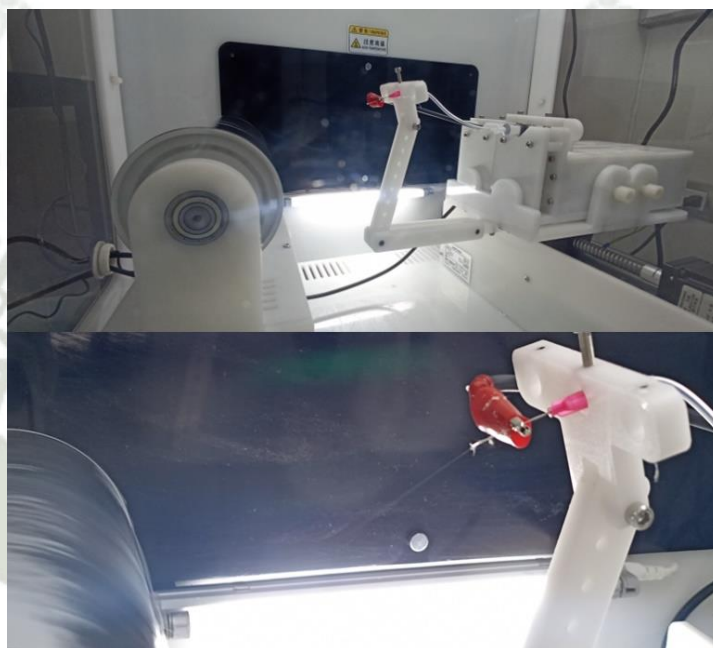


**Figura 3.15** Display con avance automático de la bomba de inyección

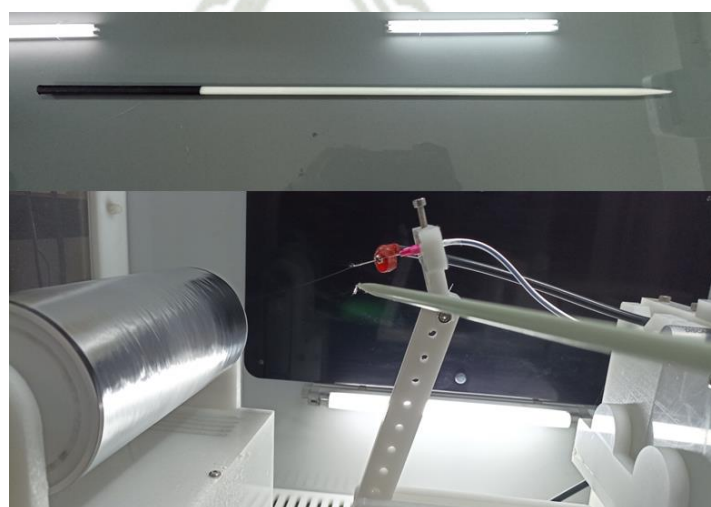


**Paso 12:** Mantener en observación el proceso de electrohilado para verificar la correcta formación del cono de Taylor como se observa en la Figura 3.16. Es muy importante no tener contacto físico directo con el conector tipo cocodrilo o el colector tipo rodillo durante la operación de electrohilado, inclusive mientras el elevador de tensión se encuentre operando, ya que se expone a riesgo de electrocución. Si necesita limpiar la boquilla de la aguja, utilizar el limpiador de plástico que se observa en la Figura 3.17.

**Figura 3.16** Proceso de electrohilado al interior de la cámara



**Figura 3.17** Limpiador de plástico



**Paso 13:** El proceso de electrohilado termina cuando se observa que no existe inyección de solución polimérica a través de la aguja de la jeringa.

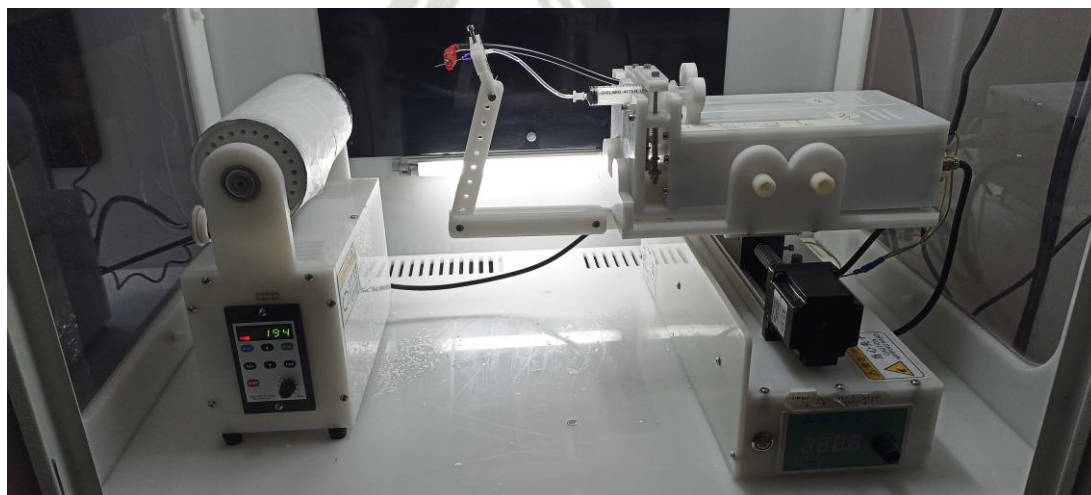
**Paso 14:** Apagar el elevador de tensión y detener el avance automático de la bomba de inyección en el display del controlador de bombas como se observa en la Figura 3.18.

**Figura 3.18** Display que muestra la opción de detenido de la bomba de inyección



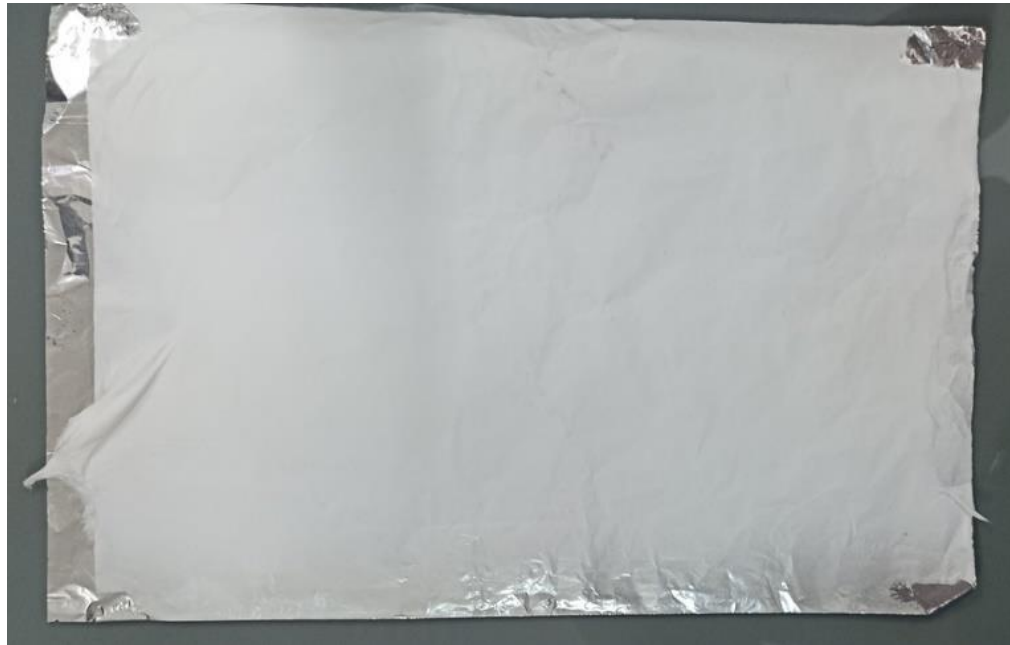
**Paso 15:** Abrir las puertas de la cámara de la máquina de electrohilado, luego apagar el colector tipo rodillo y el sistema de desplazamiento horizontal de la jeringa como se observa en la Figura 3.19.

**Figura 3.19** Apertura de puertas y finalización del proceso de electrohilado



**Paso 16:** Retirar la lámina de papel aluminio cubierta de la membrana de PLA del colector tipo rodillo como se observa en la Figura 3.20. Hacer limpieza del interior de la cámara y finalmente desconectar todos los equipos de la máquina de electrohilado.

**Figura 3.20** Lámina de papel aluminio cubierta de membrana hecha de nanofibras



### 3.4. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS DE PLA

Finalizado el proceso de electrohilado y obtenidas las membranas de PLA, se realiza la caracterización de estas.

El proceso de caracterización de las membranas de PLA está enfocado en evaluar mediante microscopía las siguientes características:

- Diámetro de las fibras en las membranas de PLA.
- Disposición de las fibras en las membranas de PLA.

Los métodos para evaluar las características previamente descritas son mediante microscopía, y son los siguientes:

- Microscopía digital.
- Microscopía electrónica de barrido.

### 3.4.1. Caracterización por microscopía digital

Este método de microscopía tiene como objetivo permitir la visualización preliminar del diámetro de las fibras de PLA, la disposición y la forma en la que se agrupan para formar las membranas obtenidas del proceso de electrohilado.

El microscopio digital para usar en esta etapa de preselección es del tipo binocular de la marca EUROTECH y modelo DN-117M con magnificaciones de 10X, 40X y 100X cuyos parámetros operacionales son los siguientes:

- Cabezal binocular rotativo a 360 grados.
- Lámpara LED de 3V/10W con brillo ajustable.
- Rango de enfoque de 30 mm.
- Filtro de luz verde.

El uso de este microscopio digital permite evaluar en primera instancia y de forma mediata los resultados obtenidos en el proceso de electrohilado y así preseleccionar las membranas que serán derivadas al método de microscopía electrónica de barrido para un estudio más profundo de las nanofibras de PLA.

### 3.4.2. Caracterización por microscopía electrónica de barrido

Este método corresponde a la etapa final de la caracterización de las membranas de PLA obtenidas del electrohilado.

El microscopio electrónico de barrido que se va a usar en esta etapa es el modelo EVO 10MA CARL ZEISS cuyos parámetros de análisis son los siguientes:

- Software: SmartSEM ZEISS.
- Voltaje: 20 kV.
- Detector: Electrones secundarios.
- Modo: Alto vacío.
- Recubierta: Oro-Paladio.

En esta etapa se va a seleccionar seis membranas de PLA más representativas del total de 18 ensayos. Estas muestras serán sometidas a diferentes magnificaciones de 500X, 2000X y 5000X con el objetivo de verificar las siguientes características:

- Mínimo diámetro de fibra dentro de la membrana de PLA.
- Máximo diámetro de fibra dentro de la membrana de PLA.
- Distribución de las nanofibras de PLA en la estructura de la membrana.



## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. RESULTADOS PRELIMINARES

Esta etapa de la investigación tiene como objetivo encontrar óptimos parámetros operativos para realizar el ensayo de electrohilado, así mismo, evaluar en primera instancia las membranas obtenidas de estos ensayos. De esta forma validar o descartar parámetros operativos y membranas obtenidas en el proceso de electrohilado.

Así mismo, en etapa se va a realizar diversas pruebas operativas con tres soluciones poliméricas a base de PLA de diferentes concentraciones al 10%(p/v), 13% (p/v) y 18% (p/v).

##### 4.1.1. Pruebas preliminares y resultados ideales del proceso de electrohilado

Las pruebas preliminares tienen como objetivo encontrar óptimos parámetros operativos para el proceso de electrohilado y obtener resultados que cumplan con las siguientes exigencias y condiciones operativas:

- Condición 1: Una adecuada formación del cono de Taylor.
- Condición 2: Una correcta y uniforme distribución del material polimérico en la superficie de papel aluminio que recubre el colector tipo rodillo.
- Condición 3: Evitar la excesiva acumulación de solución polimérica en la aguja de inyección.

Así mismo, con las condiciones y exigencias operativas establecidas anteriormente se define también las siguientes exigencias en la membrana de PLA obtenida al finalizar el proceso de electrohilado:

- Textura superficial de la membrana no excesivamente plastificada.
- Membrana permeable a cierto grado.

#### **4.1.2. Ensayos preliminares con soluciones poliméricas a base de PLA**

Se cuenta con 3 soluciones poliméricas de diferente concentración al 10%(p/v), 13% (p/v) y 18% (p/v) respectivamente. Para cada concentración en particular se va a realizar un primer ensayo con parámetros preestablecidos que son el punto de partida de esta investigación. Los parámetros operativos iniciales para el proceso de electrohilado de cada uno de estos ensayos serán los siguientes, como sugiere Persona-Báez et al. (2020).

- Elevador de potencia en 20 kV.
- Caudal de inyección de solución a 3mL/h.
- La velocidad del colector giratorio en 200 rpm.
- Diámetro de aguja de inyección de 0.6 mm, equivalente al calibre 23G.
- La cámara de trabajo establecida a temperatura de ambiente y a la humedad relativa del ambiente.

Se va a realizar tres ensayos por cada solución polimérica, considerando que se dispone de tres diferentes concentraciones al 10%(p/v), 13% (p/v) y 18% (p/v) se va a realizar nueve ensayos preliminares en total.

En cuanto a los parámetros operativos de distancia de inyección, desplazamiento lateral de la jeringa y el uso del sistema de ventilación, será distinto en cada ensayo.

##### **a) Ensayos con solución polimérica a una concentración de 10% (p/v)**

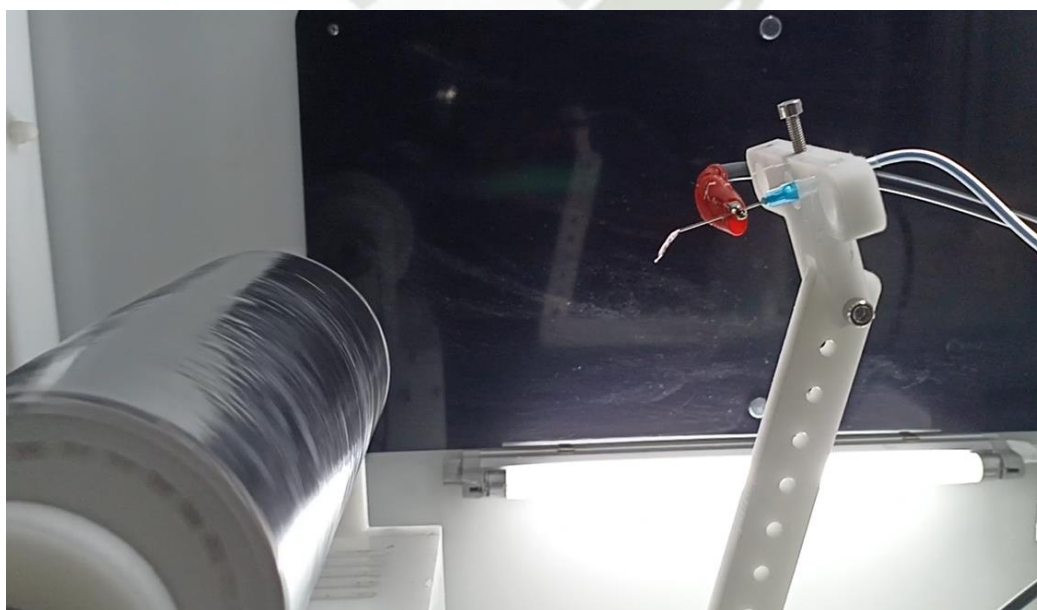
Los ensayos realizados con esta solución polimérica tienen diferentes parámetros operativos que se detallan a continuación.

**Ensayo 01:** En este ensayo se van a usar 5 mL de solución polimérica de PLA y los parámetros operativos se detallan en la Tabla 4.1. Durante el proceso de electrohilado de este ensayo, se observa que el cono de Taylor es inexistente, se genera acumulación de solución polimérica en la aguja de inyección, como se observa en la Figura 4.1, y la solución que se inyecta a través de la aguja en algunas ocasiones es atraída en forma de gotas hacia el colector como se observa en la Figura 4.2. Por lo tanto, la deposición del material sobre el papel aluminio es casi nula.

**Tabla 4.1** Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 01

	CONCENTRACION	10%	UNIDAD
1	Voltaje	20	kV
2	Caudal	3	mL/h
3	Calibre de aguja	23G (0,6 mm)	
4	Distancia de inyección	120	mm
5	Velocidad de colector	200	RPM
6	Desplazamiento lateral	100	mm/min
7	Temperatura	21,4 hasta 24,7	°C
8	Humedad relativa	20,1 hasta 23,3	%
9	Ventilación	Encendida	

**Figura 4.1** Cono de Taylor inexistente en aguja de inyección



**Figura 4.2** Solución polimérica atraída en forma de gota al colector



**Ensayo 02:** En este ensayo se van a usar 5 mL de solución polimérica de PLA y los parámetros operativos se detallan en la Tabla 4.2. En el desarrollo de este ensayo se observa que el cono de Taylor es inexistente, se genera excesiva acumulación de la solución polimérica en la aguja de inyección y la deposición del material sobre el papel aluminio es baja, en pocas ocasiones se observa a la solución ser atraída en forma de gotas o en forma de hilo constante tal como se observa en la Figura 4.3.

**Tabla 4.2** Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 02

	CONCENTRACION	10%	UNIDAD
1	Voltaje	30	kV
2	Caudal	4	mL/h
3	Calibre de aguja	25G (0,5 mm)	
4	Distancia de inyección	100	mm
5	Velocidad de colector	300	RPM
6	Desplazamiento lateral	200	mm/min
7	Temperatura	20,9 hasta 23,8	°C
8	Humedad relativa	30	%
9	Ventilación	Apagada	

**Figura 4.3** Solución polimérica atraída en forma de hilo al colector

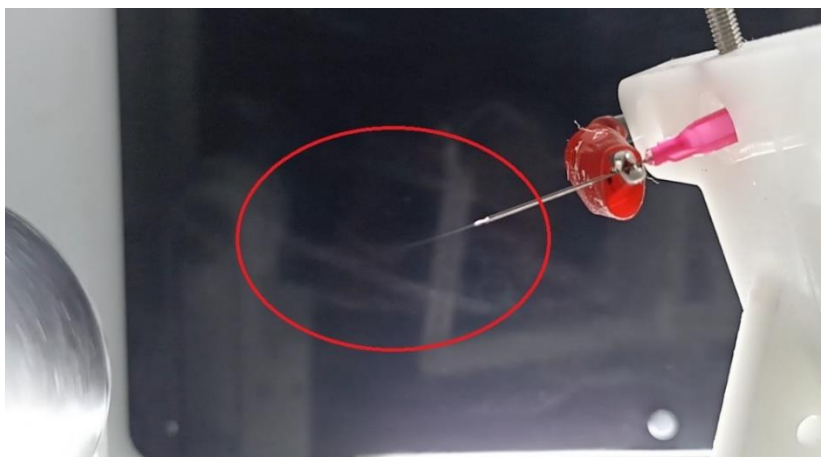


**Ensayo 03:** En este ensayo se van a usar 5 mL de solución polimérica de PLA y los parámetros operativos se detallan en la Tabla 4.3. En el desarrollo de este ensayo se observa que el cono de Taylor es estable, se genera poca acumulación y desechos de solución polimérica a través de la aguja de inyección, y la deposición del material sobre el papel aluminio es estable tal como se observa en la Figura 4.4.

**Tabla 4.3** Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 03

	CONCENTRACION	10%	UNIDAD
1	Voltaje	10	kV
2	Caudal	1	mL/h
3	Calibre de aguja	25G (0,5 mm)	
4	Distancia de inyección	80	mm
5	Velocidad de colector	100	RPM
6	Desplazamiento lateral	300	mm/min
7	Temperatura	20,9 hasta 23,8	°C
8	Humedad relativa	20,1 hasta 23,3	%
9	Ventilación	Encendida	

**Figura 4.4** Formación del cono de Taylor



**b) Ensayos con solución polimérica a una concentración de 13% (p/v)**

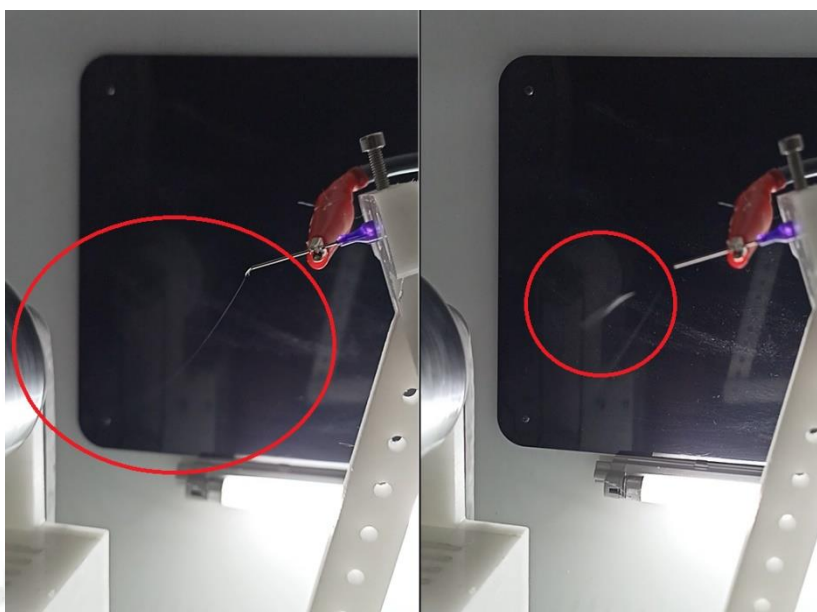
Se realizan 3 ensayos de electrohilado con esta solución polimérica, éstos tienen parámetros operativos distintos que se detallan a continuación.

**Ensayo 04:** En este ensayo se van a usar 5 mL de solución polimérica de PLA y los parámetros operativos se detallan en la Tabla 4.4. Durante el proceso de electrohilado de este ensayo, se observa que el cono de Taylor es muy irregular y por momentos inexistente, se genera goteo de solución polimérica en la aguja de inyección y la deposición del material sobre el papel aluminio es regular, pero no uniforme debido a que se observa a la solución ser atraída en forma de gotas y en forma de hilo hacia el colector de rodillo como se observa en la Figura 4.5.

**Tabla 4.4** Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 04

	CONCENTRACION	13%	UNIDAD
1	Voltaje	20	kV
2	Caudal	3	mL/h
3	Calibre de aguja	23G (0,6 mm)	
4	Distancia de inyección	100	mm
5	Velocidad de colector	200	RPM
6	Desplazamiento lateral	100	mm/min
7	Temperatura	19,8 hasta 24,5	°C
8	Humedad relativa	18,5 hasta 22,3	%
9	Ventilación	Encendida	

**Figura 4.5** Solución polimérica atraída hacia el colector de rodillo



**Ensayo 05:** En este ensayo se van a usar 5 mL de solución polimérica de PLA y los parámetros operativos se detallan en la Tabla 4.5. Durante el proceso de electrohilado de este ensayo, se observa un hilo de la solución que es inyectada a través de la aguja y a continuación la formación del cono de Taylor de forma estable, además se genera una acumulación y goteo normal de solución polimérica en la aguja y la deposición del material electrohilado sobre el papel aluminio es buena, tal como se observa en la Figura 4.6.

**Tabla 4.5** Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 05

	CONCENTRACION	13%	UNIDAD
1	Voltaje	10	kV
2	Caudal	2	mL/h
3	Calibre de aguja	24G (0,55 mm)	
4	Distancia de inyección	120	mm
5	Velocidad de colector	100	RPM
6	Desplazamiento lateral	300	mm/min
7	Temperatura	20,3 hasta 23,8	°C
8	Humedad relativa	21,1 hasta 24,3	%
9	Ventilación	Encendida	

**Figura 4.6** Inyección de solución polimérica y formación del cono de Taylor

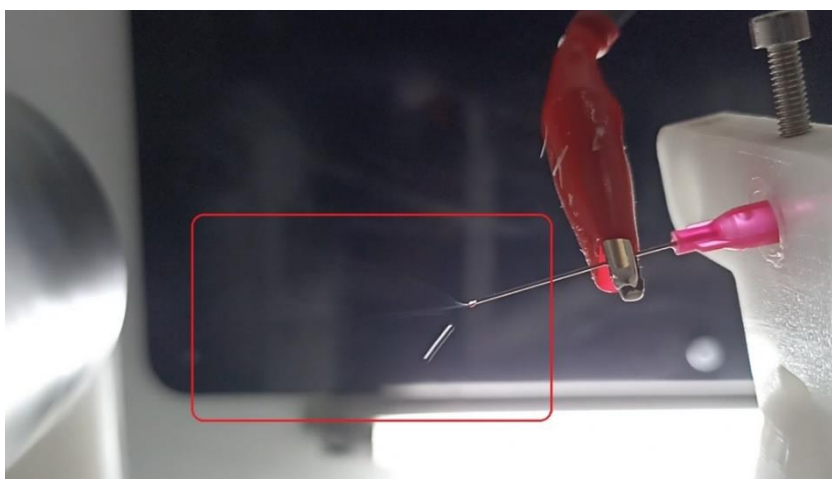


**Ensayo 06:** En este ensayo se van a usar 5 mL de solución polimérica de PLA y los parámetros operativos se detallan en la Tabla 4.6. En este proceso de electrohilado se observa que la velocidad de inyección del material polimérico a través de la aguja es muy rápido y la fuerza de atracción hacia el colector de rodillo es mínima, por lo tanto, el cono de Taylor es inexistente y se genera excesivo goteo de solución polimérica en la aguja de inyección como se observa en la Figura 4.7, también se observa que la deposición del material sobre el papel aluminio es casi inexistente mostrando solo algunas gotas secas de PLA dispersas en la superficie.

**Tabla 4.6** Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 06

	CONCENTRACION	13%	UNIDAD
1	Voltaje	5	kV
2	Caudal	7	mL/h
3	Calibre de aguja	25G (0,5 mm)	
4	Distancia de inyección	70	mm
5	Velocidad de colector	300	RPM
6	Desplazamiento lateral	400	mm/min
7	Temperatura	20,2 hasta 25,6	°C
8	Humedad relativa	19,2 hasta 23,9	%
9	Ventilación	Encendida	

**Figura 4.7** Inyección y goteo de solución polimérica



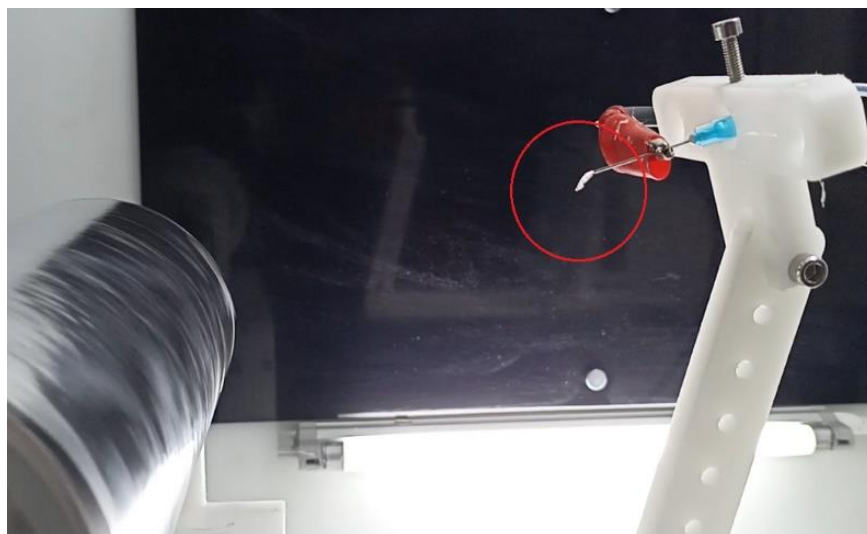
**c) Ensayos con solución polimérica a una concentración de 18% (p/v)**

Se realizan 3 ensayos con esta solución polimérica, que tienen diferentes parámetros operativos que se detallan a continuación.

**Ensayo 07:** En este ensayo se van a usar 5 mL de solución polimérica de PLA y los parámetros operativos se detallan en la Tabla 4.7. En este proceso de electrohilado se observa que el cono de Taylor es inexistente y se genera excesiva acumulación de solución polimérica en la aguja de inyección como se observa en la Figura 4.8, solo en algunos casos la solución es atraída hacia el colector en forma de gotas como se observa en la Figura 4.9, la deposición del material sobre el papel aluminio es casi inexistente mostrando solo algunas gotas secas de PLA dispersas en la superficie.

**Tabla 4.7** Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 07

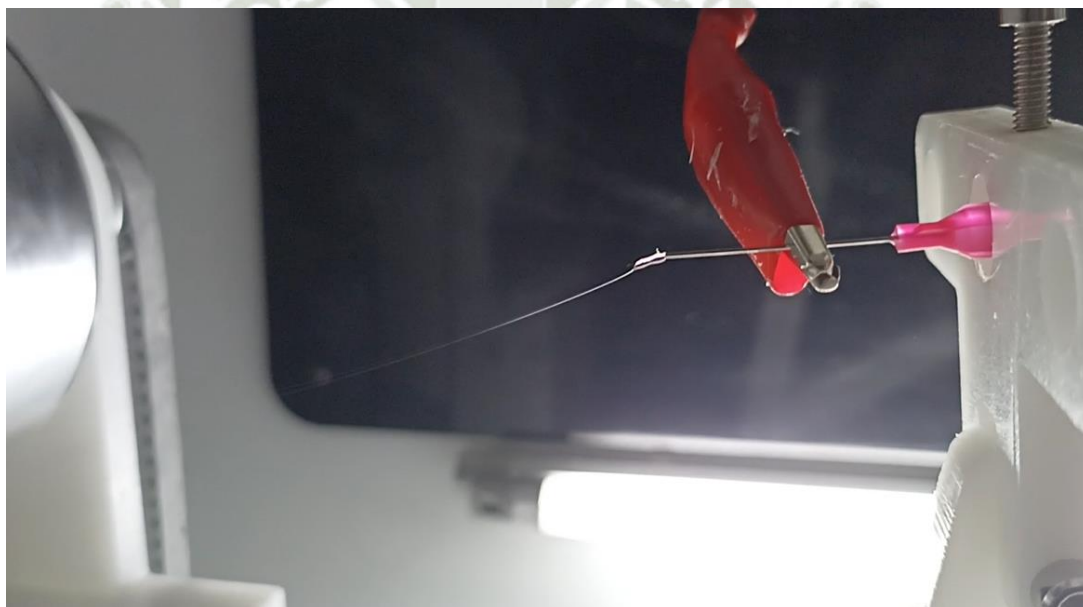
	CONCENTRACION	18%	UNIDAD
1	Voltaje	20	kV
2	Caudal	3	mL/h
3	Calibre de aguja	23G (0,6 mm)	
4	Distancia de inyección	120	mm
5	Velocidad de colector	200	RPM
6	Desplazamiento lateral	100	mm/min
7	Temperatura	20,8 hasta 25,5	°C
8	Humedad relativa	19,9 hasta 21,3	%
9	Ventilación	Encendida	

**Figura 4.8** Acumulación de solución polimérica**Figura 4.9** Gota de solución atraída al colector de rodillo

**Ensayo 08:** En este ensayo se van a usar 5 mL de solución polimérica de PLA y los parámetros operativos se detallan en la Tabla 4.8. Se observa una inyección de solución polimérica estable que forma un hilo que es atraído hacia el colector de rodillo, también se visualiza un cono de Taylor estable que se genera a una muy corta distancia de la superficie del colector, se genera poca acumulación de solución en la aguja de inyección como se observa en la Figura 4.10, finalmente la deposición del material sobre la superficie del papel aluminio es buena.

**Tabla 4.8** Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 08

	CONCENTRACION	18%	UNIDAD
1	Voltaje	13	kV
2	Caudal	5	mL/h
3	Calibre de aguja	25G (0,5 mm)	
4	Distancia de inyección	80	mm
5	Velocidad de colector	100	RPM
6	Desplazamiento lateral	400	mm/min
7	Temperatura	19,8 hasta 25,1	°C
8	Humedad relativa	20,9 hasta 23,3	%
9	Ventilación	Encendida	

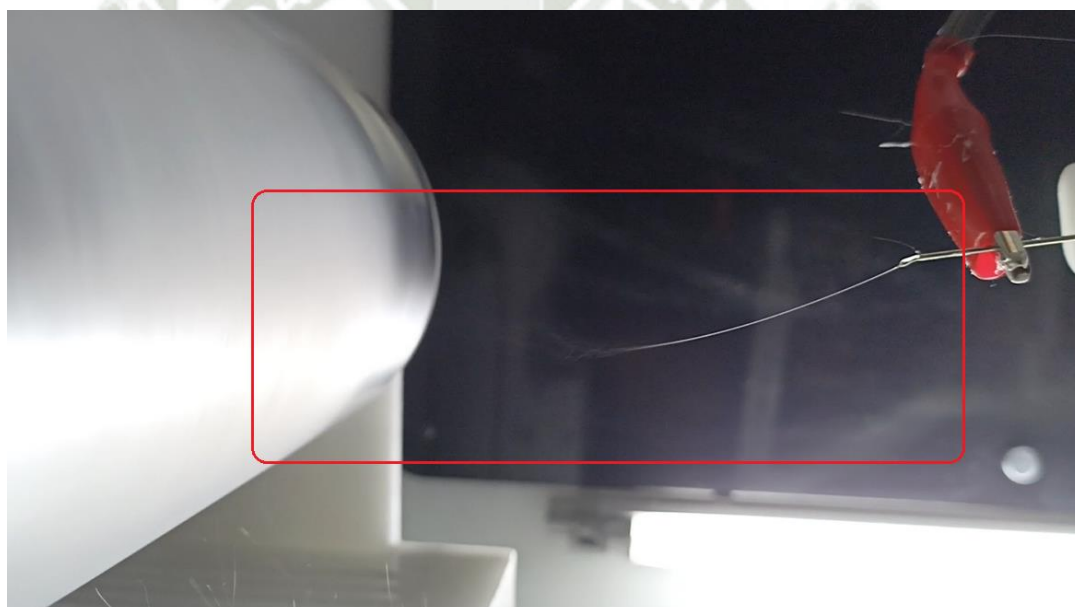
**Figura 4.10.** Solución polimérica atraída en forma de hilo hacia el colector de rodillo

**Ensayo 09:** En este ensayo se van a usar 5 mL de solución polimérica de PLA y los parámetros operativos se detallan en la Tabla 4.9. Se observa que la solución polimérica al ser inyectada a través de la aguja forma un hilo que al aproximarse al colector de rodillo forma un cono de Taylor estable durante el proceso, no se genera excesiva acumulación de solución en la aguja como se observa en la Figura 4.11, y finalmente la deposición del material sobre el papel aluminio es estable y buena.

**Tabla 4.9** Descripción de parámetros y condiciones operativas del ensayo 09

	CONCENTRACION	18%	UNIDAD
1	Voltaje	8	kV
2	Caudal	4	mL/h
3	Calibre de aguja	21G (0,8 mm)	
4	Distancia de inyección	100	mm
5	Velocidad de colector	500	RPM
6	Desplazamiento lateral	100	mm/min
7	Temperatura	20,1 hasta 24,7	°C
8	Humedad relativa	18,7 hasta 21,8	%
9	Ventilación	Encendida	

**Figura 4.11** Solución polimérica inyectada y formación del cono de Taylor



#### 4.1.3. Evaluación de resultados obtenidos de pruebas preliminares

La evaluación de resultados de las pruebas preliminares tiene como objetivo estimar un óptimo rango de parámetros operativos extraídos a partir de los procesos de electrohilado que tengan buenos resultados en cuanto a las membranas de PLA.

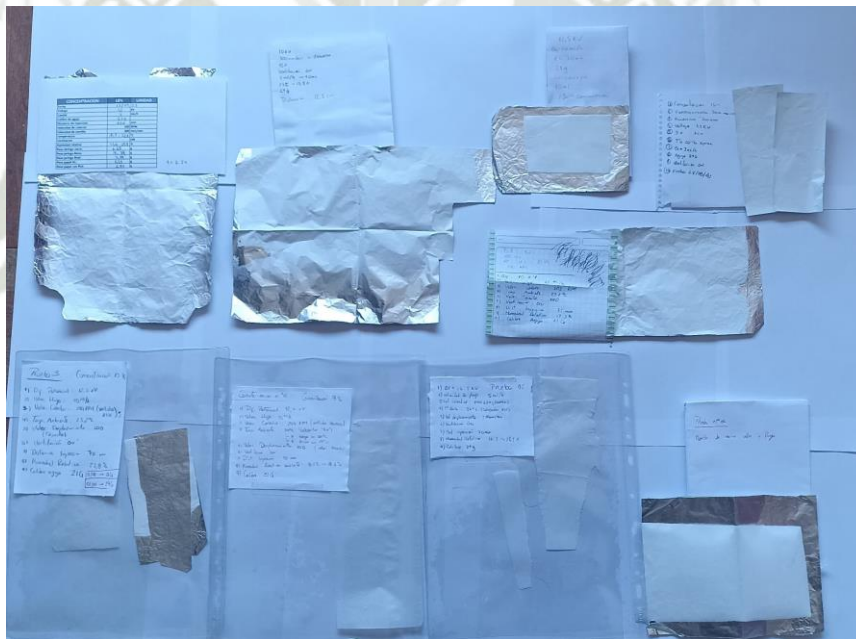
Por lo tanto, se va a utilizar las siguientes dos técnicas para evaluar estos resultados preliminares:

- Inspección de membranas obtenidas: Busca evaluar de forma visual y táctil la textura de la membrana obtenida y su permeabilidad.
- Análisis microscópico de membranas: Mediante el uso de un microscopio digital se realiza el estudio de la estructura interna y la disposición de las fibras de PLA que conforman las membranas.

#### a) Inspección de membranas obtenidas

Esta actividad implica la inspección visual y táctil de las 9 membranas, como se observa en la Figura 4.12, las cuales han sido obtenidas del proceso de electrohilado y en las cuales se va a identificar las características como la textura final y su grado de permeabilidad.

**Figura 4.12** Membranas obtenidas de los ensayos preliminares



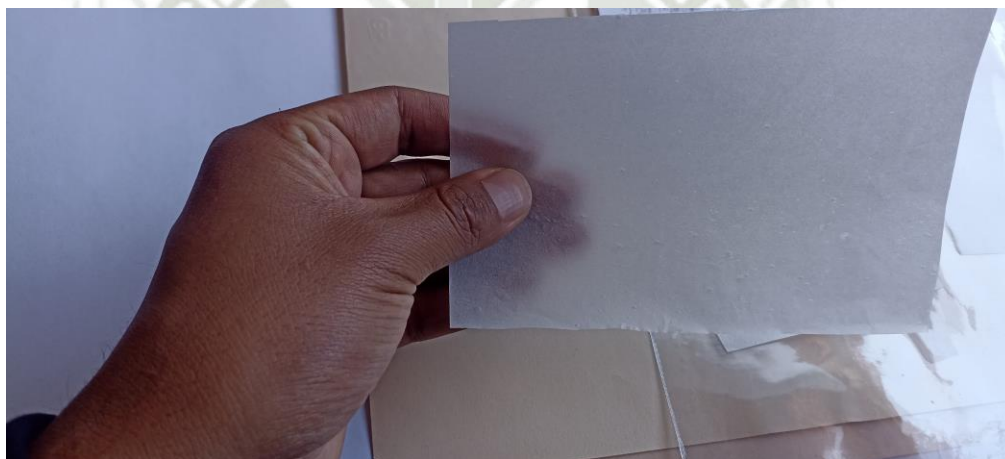
Finalizado el proceso de electrohilado se realiza la posterior inspección de las membranas de acuerdo con los siguientes pasos secuenciales:

- Retirar de forma cuidadosa la membrana de PLA depositada sobre el papel aluminio.
- Colocar la membrana de PLA sobre una superficie de trabajo limpia.
- Evaluar la textura superficial de la membrana mediante el tacto directo con las manos y dedos, como se muestra en la Figura 4.13.

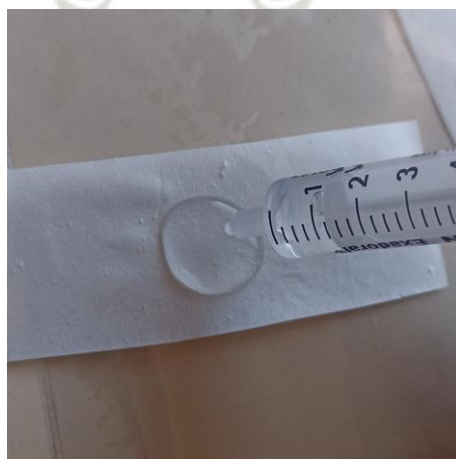
- Cortar un segmento de la membrana y verter en su superficie 1mL de agua para observar su grado de absorción, como se observa en la Figura 4.14.
- Cortar un segmento de la membrana y aplicar sobre su superficie aire a baja presión para evaluar si es permeable al aire, como se muestra en la Figura 4.15.
- Anotar todas las observaciones encontradas de la membrana.

Al finalizar la inspección visual y táctil, se selecciona 3 membranas que tengan una superficie no muy plastificada y aquellas que sean permeables al agua y al aire en cierto grado, aquellas que cumplan con esos requisitos son catalogadas como elegibles para definir posteriormente parámetros óptimos de operación.

**Figura 4.13** Inspección táctil de la membrana



**Figura 4.14** Inspección de la membrana de su permeabilidad con el agua



**Figura 4.15** Inspección de la membrana de su permeabilidad con el aire



#### **b) Análisis microscópico de membranas**

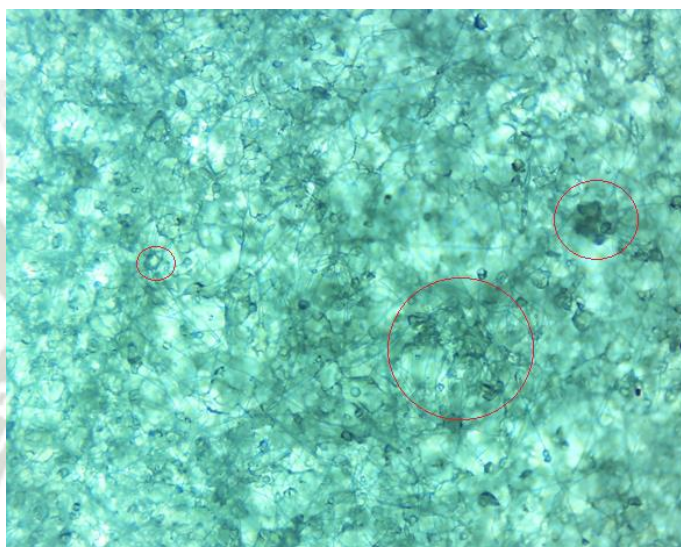
El objetivo de esta actividad es evaluar de forma rápida las características microscópicas de la membrana como son la disposición de las fibras, el diámetro estimado de las fibras e irregularidades o defectos. Finalmente, con estos datos orientar la selección de óptimos parámetros operativos.

Se realiza el estudio microscópico de 3 muestras obtenidas del proceso de electrohilado con 3 soluciones poliméricas a diferentes concentraciones de 10% (p/v), 13% (p/v) y 18% (p/v) respectivamente. Estas muestras son seleccionadas entre las 9 pruebas preliminares anteriormente detalladas en el apartado 4.1.2 “Ensayos preliminares con soluciones poliméricas a base de PLA” de esta investigación. Por lo tanto, las 3 muestras seleccionadas corresponden a la membrana más representativa según su concentración porcentual (p/v).

Para la evaluación microscópica de la membrana, se realiza el corte de un segmento y este se lleva al microscopio digital y se evalúa la muestra a 3 magnificaciones de 10X, 40X Y 100X. A continuación, se muestran las fotografías obtenidas de la evaluación microscópica de las membranas más representativas.

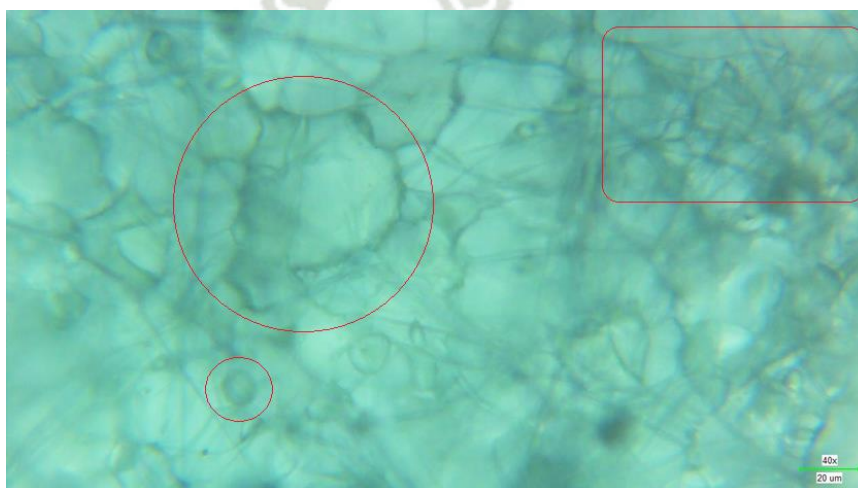
**Evaluación microscópica de membrana a una concentración de 10% (p/v):** En la Figura 4.16 se observa la vista general de la membrana a una magnificación de 10X, donde se aprecia la presencia de defectos como son las múltiples salpicaduras en toda el área de muestra y no es muy visible la formación de las fibras en la estructura de la membrana.

**Figura 4.16** Membrana de PLA de concentración 10%(p/v) a una magnificación de 10X



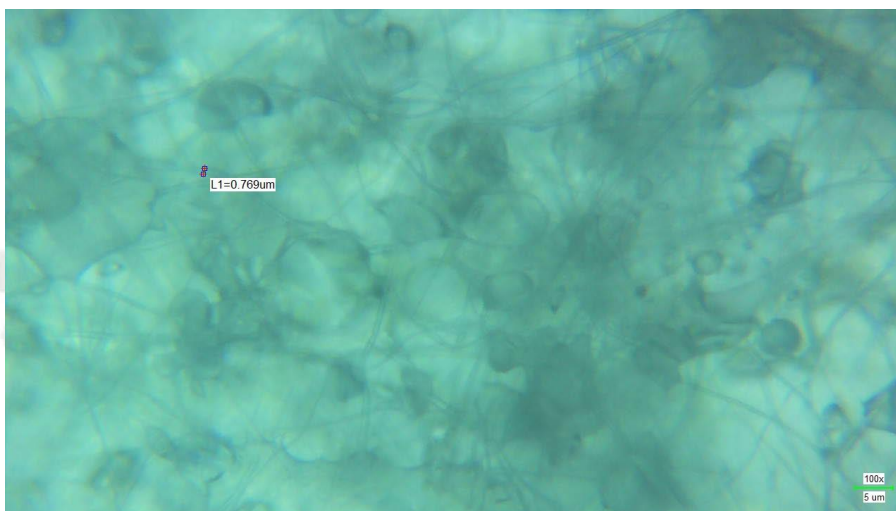
La Figura 4.17 muestra la membrana a una magnificación de 40X donde se observa encerrado en círculos la presencia de salpicaduras. También se logra observar en la zona señalizada con un rectángulo la disposición estructural que han tomado las fibras de PLA para formar la membrana.

**Figura 4.17** Membrana de PLA de concentración 10%(p/v) a una magnificación de 40X



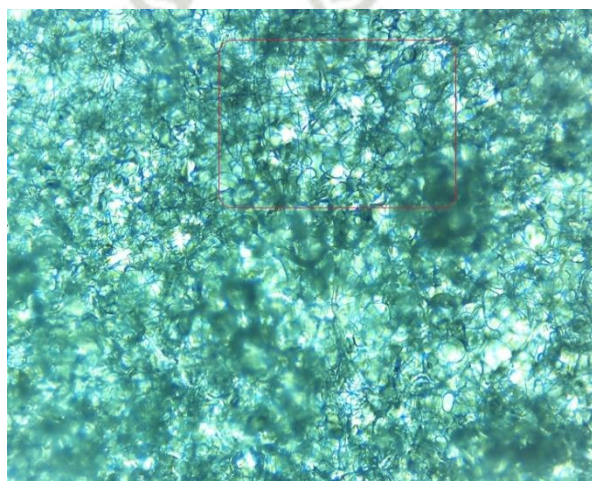
La Figura 4.18 muestra la membrana a una magnificación de 100X en donde se puede observar la disposición estructural de las fibras de PLA a una escala de 5 micras, así mismo se puede identificar una fibra de diámetro de 0,7 micras. También se observan salpicaduras en la estructura de la membrana.

**Figura 4.18** Membrana de PLA de concentración 10%(p/v) a una magnificación de 100X



**Evaluación microscópica de membrana a una concentración de 13% (p/v):** En la Figura 4.19 se observa un segmento de la membrana de PLA a una magnificación de 10X, en donde se puede observar la disposición estructural que han tomado las fibras, sin embargo, se observa también la presencia de múltiples salpicaduras en la estructura de la membrana.

**Figura 4.19** Membrana de PLA de concentración 13%(p/v) a una magnificación de 10X



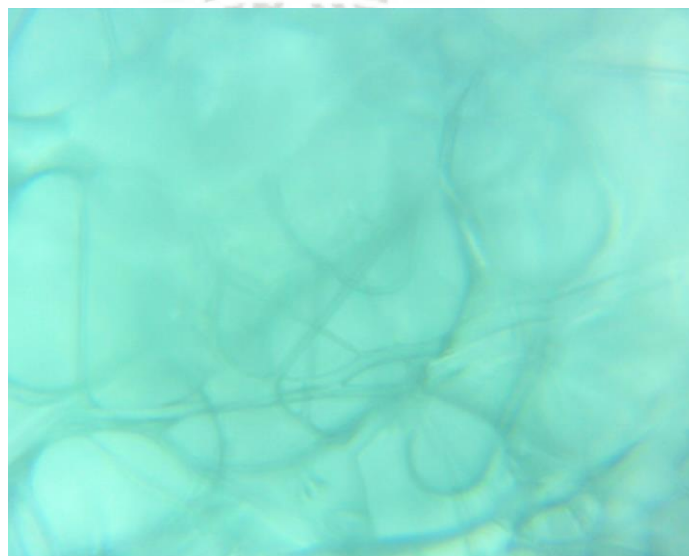
En la Figura 4.20 se muestra la membrana a una magnificación de 40X, en donde se observa la disposición y el entrelazamiento que han tomado las fibras de PLA dentro de la estructura de la membrana. También se observan salpicaduras.

**Figura 4.20** Membrana de PLA de concentración 13%(p/v) a una magnificación de 40X



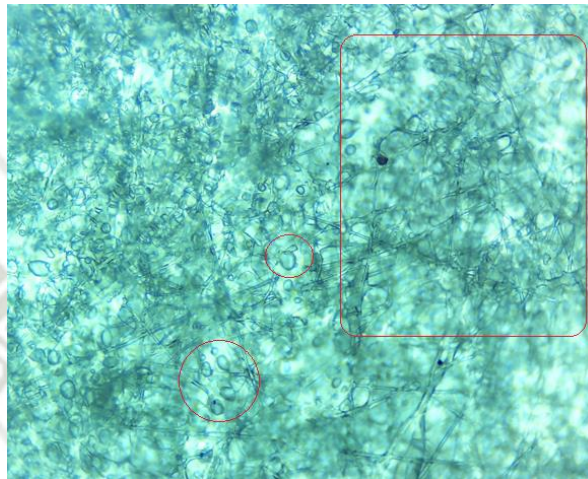
En la Figura 4.21 se muestra la membrana a una magnificación de 100X donde se aprecia a mayor detalle el entrelazamiento que han tomado las fibras de PLA en la estructura interna de la membrana.

**Figura 4.21** Membrana de PLA de concentración 13%(p/v) a una magnificación de 100X



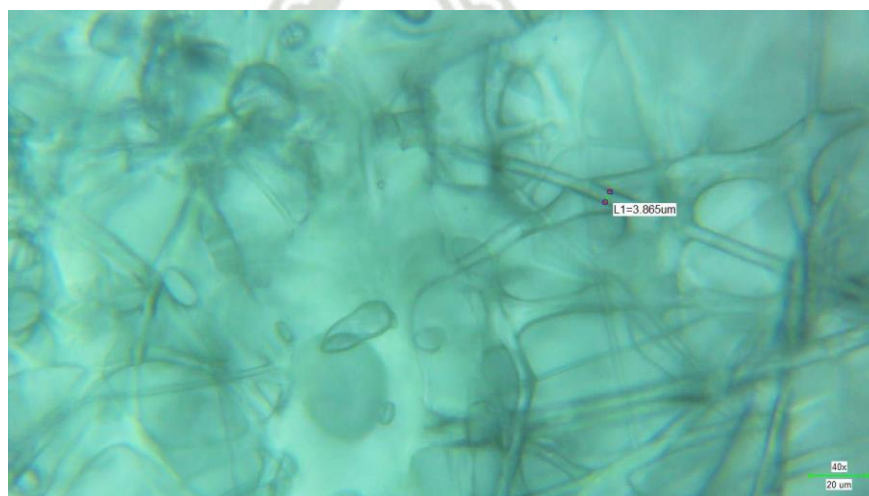
**Evaluación microscópica de membrana a una concentración de 18% (p/v):** En la Figura 4.22 se muestra la membrana a una magnificación de 10X, aquí se observa enmarcado en el rectángulo en la zona derecha el entrelazamiento de las fibras de PLA en la estructura de la membrana, así mismo, se ve defectos como salpicaduras.

**Figura 4.22** Membrana de PLA de concentración 18%(p/v) a una magnificación de 10X



En la Figura 4.23 se muestra la membrana a una magnificación de 40X, en la que se observa el entrelazamiento de las fibras de PLA hasta una escala de 20 micrómetros donde se identifica a una de las fibras con un diámetro de 3,8 micrómetros. También se observa defectos de salpicadura.

**Figura 4.23** Membrana de PLA de concentración 18%(p/v) a una magnificación de 40X



En la Figura 4.24 se muestra la membrana a una magnificación de 100X, donde se observa a mayor detalle el entrelazamiento de las fibras hasta una escala de 5 micrómetros.

**Figura 4.24** Membrana de PLA de concentración 18%(p/v) a una magnificación de 100X



#### 4.1.4. Optimización y ajuste de parámetros del proceso de electrohilado

Establecer un rango óptimo de parámetros operativos permite a esta investigación obtener resultados dentro de un rango de aceptación bueno, con el objetivo de realizar un posterior estudio a mayor detalle de la estructura interna y las características microscópicas de las membranas obtenidas del proceso de electrohilado utilizando la microscopía electrónica de barrido SEM.

La ejecución de pruebas preliminares detalladas en el apartado 4.1.2 de esta investigación muestra la obtención de buenos resultados dentro de los siguientes rangos de parámetros operativos:

- Diferencia de potencial desde 7 kV hasta 15 kV.
- Caudal desde 1 mL/h hasta 5 mL/h.
- Velocidad de colector de rodillo entre 200 RPM y 400 RPM.
- Desplazamiento lateral de jeringa: entre 100 y 300 mm/min.
- Distancia de inyección entre 70 y 120 mm.
- Concentración de la solución entre 13%(p/v) y 18%(p/v).

Por lo tanto, con los rangos operativos anteriormente detallados se puede iniciar con la ejecución de ensayos finales y el posterior estudio de caracterización de las membranas de PLA obtenidas de dichos procesos de electrohilado.

## 4.2. RESULTADOS FINALES

### 4.2.1. Proceso de electrohilado optimizado

El proceso optimizado corresponde a la selección de parámetros óptimos en función de la evaluación del proceso de electrohilado y las membranas de PLA obtenidas en los ensayos preliminares, por lo tanto, se selecciona parámetros operativos donde se muestre buenos resultados en las siguientes exigencias:

- Formación estable del cono de Taylor durante todo el proceso de electrohilado.
- Eficiente deposición de material sobre el papel aluminio.
- Poca generación de residuos de material polimérico.
- Membrana de PLA con textura superficial no excesivamente plastificada.
- Membrana de PLA permeable a cierto grado.

#### a) Óptimos parámetros de operación y de concentración de la solución polimérica

La evaluación y selección de las membranas de PLA obtenidas en los ensayos preliminares que muestran óptimas condiciones operativas y buenos resultados en cuanto a la textura superficial y la permeabilidad de la membrana permite definir los 4 parámetros más relevantes en esta etapa investigativa. A continuación, se definen estos 4 parámetros y los rangos de variación:

**Voltaje de electrohilado:** Se selecciona los voltajes de 7.5kV, 10kV y 12.5kV debido a que muestran una mejor generación y estabilidad del cono de Taylor durante el proceso de electrohilado.

**Distancia de inyección:** Se elige una inyección del material a una distancia de 100 mm y un ángulo de 0 grados respecto a la horizontal debido a que se observa una mejor estabilidad la inyección del material y estabilidad en la formación del cono de Taylor.

**Caudal de inyección:** Se establece un caudal de 3 mL/h, 4 mL/h y 5 mL/h debido a que los procesos de electrohilado con dichos caudales muestra mayor estabilidad y generan una menor producción de residuos y acumulación de material polimérico en la aguja de inyección.

**Características de la solución de PLA:** Se elige 2 concentraciones de la solución polimérica en los valores de 13% (p/v) y 18%(p/v), debido a que, en la evaluación de muestras con el microscopio digital, estas concentraciones son las que muestran mejores resultados en cuanto a la morfología y el entrelazamiento de las fibras en la estructura interna de la membrana, así mismo, en cuanto a una menor muestra de salpicaduras y defectos estructurales de la membrana.

#### **b) Parámetros operativos constantes en el proceso de electrohilado**

Igualmente, al definir la variación de parámetros operativos y características de la solución polimérica anteriormente detallados, se debe establecer parámetros operativos constantes para todos los ensayos finales de electrohilado que son los siguientes:

- Calibre de aguja de jeringa: 21G (diámetro de 0,8 mm)
- Velocidad de giro de colector: 300 RPM
- Velocidad de desplazamiento lateral de jeringa: 300 mm/min
- Ventilación: Encendida
- Temperatura: Temperatura del ambiente de la cámara de electrohilado
- Humedad Relativa: Humedad del ambiente de la cámara de electrohilado

#### **4.2.2. Ejecución de ensayos finales de electrohilado**

Finalmente, con la variación de parámetros operativos y características de concentración de la solución polimérica establecidas en el apartado anterior, se define un total de 18 ensayos finales, los cuales se detallan a continuación en la Tabla 4.10 que posteriormente se van a ejecutar.

**Tabla 4.10** Descripción de parámetros de ensayos finales

	Concentración	Voltaje [kV]	Caudal [mL/h]
1	13%	7,5	3
2	13%	10	3
3	13%	12,5	3
4	13%	7,5	4
5	13%	10	4
6	13%	12,5	4
7	13%	7,5	5
8	13%	10	5
9	13%	12,5	5
10	18%	7,5	3
11	18%	10	3
12	18%	12,5	3
13	18%	7,5	4
14	18%	10	4
15	18%	12,5	4
16	18%	7,5	5
17	18%	10	5
18	18%	12,5	5

**a) Ensayos finales con solución polimérica de concentración 13%(p/v)**

Se realiza un total de 9 ensayos con la solución polimérica a base de PLA que tiene una concentración del 13% (p/v). Cada ensayo tiene parámetros operativos distintos, los cuales se detallan a continuación.

**Ensayo final 01:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.11. Durante el proceso de electrohilado se observa que la inyección de solución polimérica a través de la aguja es estable y la generación del cono de Taylor es buena y se mantiene durante el proceso como se muestra en la Figura 4.25, también se visualiza que la deposición del material polimérico sobre la superficie de papel aluminio que recubre el colector de rodillo es buena y constante. Se observa poco goteo y acumulación de solución polimérica en la aguja de inyección, por lo tanto, se no se muestra goteo y se genera pocos residuos.

**Tabla 4.11** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 01 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P1-13%
<b>Fecha de ensayo</b>	05/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	13 %
<b>Voltaje</b>	12,5 kV
<b>Caudal</b>	3 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	20 - 23 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	19 - 21,6 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,64 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	19,98 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,38 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,36 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	3 horas y 20 minutos

**Figura 4.25** Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 01



**Ensayo final 02:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.12. Durante la ejecución de este ensayo se aprecia una prolongada estabilidad en la inyección de la solución polimérica a través de la aguja, así mismo, se observa bastante estabilidad en la generación del cono de Taylor como se muestra en la Figura 4.26. La deposición del material polimérico sobre la superficie de papel aluminio es buena y constante; se genera poca acumulación de solución en la aguja de inyección y no se muestra goteo, por lo tanto, se genera pocos residuos durante el proceso de electrohilado.

**Tabla 4.12** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 02 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P2-13%
<b>Fecha de ensayo</b>	06/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	13 %
<b>Voltaje</b>	10 kV
<b>Caudal</b>	3 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	20,4 - 23,7 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	19,4 - 22,5 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,57 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	20,45 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,45 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,41 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	3 horas y 10 minutos

**Figura 4.26** Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 02



**Ensayo final 03:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.13. En este ensayo se observa que la inyección de material polimérico a través de la aguja es continuo y estable, así mismo, la generación del cono de Taylor es buena y se mantiene constante durante el proceso como se muestra en la Figura 4.27, también se observa que en el proceso la deposición del material polimérico sobre la superficie que cubre el colector de rodillo es buena. No se observa una excesiva acumulación de material en la aguja de inyección, pero es gradual y se necesita limpieza. No existe goteo y no se genera excesivos residuos.

**Tabla 4.13** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 03 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P3-13%
<b>Fecha de ensayo</b>	07/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	13 %
<b>Voltaje</b>	7,5 kV
<b>Caudal</b>	3 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	19,7 - 23,2 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	23,2 - 18,6 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,63 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	20,15 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,4 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,37 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	2 horas y 20 minutos

**Figura 4.27** Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 03



**Ensayo final 04:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.14. Durante el ensayo se observa que la solución polimérica al ser inyectada se inclina ligeramente hacia abajo respecto a la horizontal, se observa también que la formación del cono de Taylor tiene buen aspecto y se mantiene estable durante el proceso como se muestra en la Figura 4.28; la deposición del material sobre la superficie del papel aluminio que recubre el colector de rodillo es eficiente. Se genera acumulación progresiva de material polimérico en la aguja de inyección que se tiene que limpiar periódicamente, por lo tanto, se genera residuos.

**Tabla 4.14** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 04 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P4-13%
<b>Fecha de ensayo</b>	11/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	13 %
<b>Voltaje</b>	7,5 kV
<b>Caudal</b>	5 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	22,6 - 23,2 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	20,4 - 18,1 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,58 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	20,21 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,43 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,37 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	1 hora y 55 minutos

**Figura 4.28** Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 04



**Ensayo final 05:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.15. Se observa que la inyección de la solución es buena y se genera un hilo constante ligeramente inclinado hacia abajo respecto a la horizontal y como consecuencia se genera un cono de Taylor estable, sin embargo, se observa ocasionalmente que el hilo se interrumpe para luego generarse nuevamente y reestablecer todo el proceso de electrohilado como se muestra en la Figura 4.29. La deposición del material sobre la superficie del colector es eficiente y buena, así mismo, se genera periódicamente acumulación de la solución en la aguja de inyección, por lo tanto, se genera residuos esporádicamente.

**Tabla 4.15** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 05 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P5-13%
<b>Fecha de ensayo</b>	11/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	13 %
<b>Voltaje</b>	7,5 kV
<b>Caudal</b>	4 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	23,5 - 23,8 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	20,8 - 22,4 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,58 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	20,08 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,41 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,26 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	2 horas y 10 minutos

**Figura 4.29** Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 05

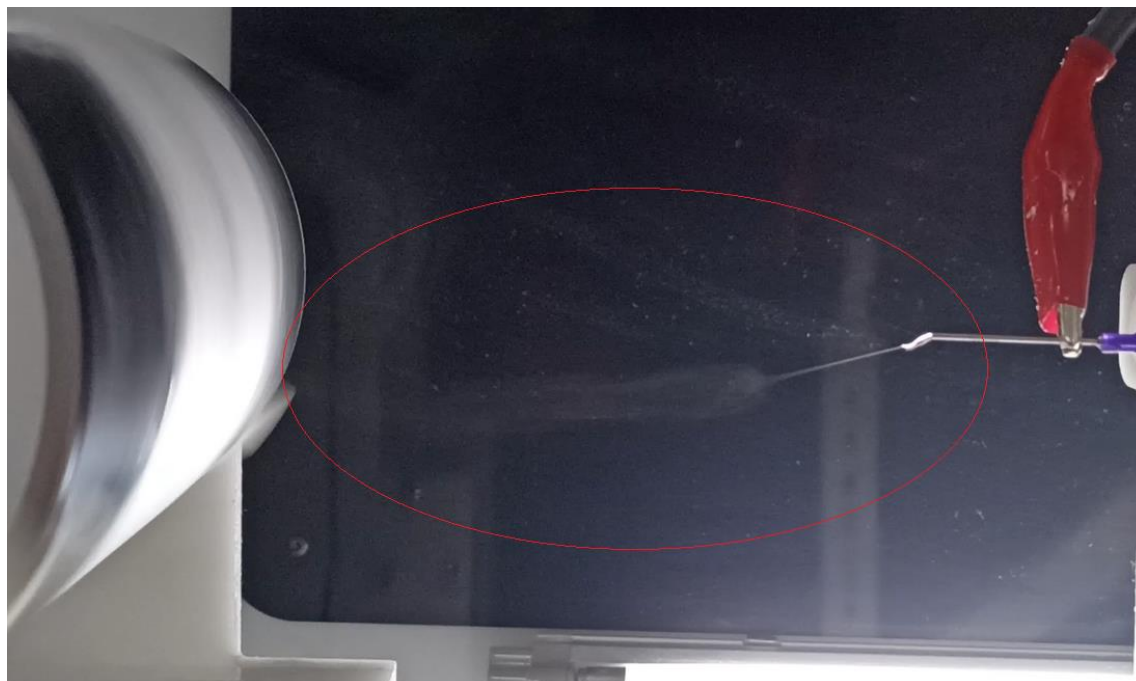


**Ensayo final 06:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.16. Se observa una inyección de la solución polimérica estable y constante, así mismo, se genera un cono de Taylor estable y de buen aspecto durante todo el proceso de electrohilado como se muestra en la Figura 4.30. La deposición del material sobre la superficie del colector es buena y eficiente. No se genera mucha acumulación de material polimérico en la aguja de inyección, por lo tanto, se genera pocos residuos.

**Tabla 4.16** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 06 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P6-13%
<b>Fecha de ensayo</b>	12/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	13 %
<b>Voltaje</b>	10 kV
<b>Caudal</b>	4 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	22,2 - 23,5 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	28,8 - 19,3 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,62 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	19,83 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,43 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,36 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	2 horas y 20 minutos

**Figura 4.30** Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 06



**Ensayo final 07:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.17. Se observa una inyección de solución polimérica constante y a continuación la formación del cono de Taylor que es bastante estable como se muestra en la Figura 4.31. La deposición del material sobre la superficie del colector es buena y eficiente. Periódicamente se genera la acumulación de material en la aguja de inyección, por lo tanto, se genera ocasionalmente residuos.

**Tabla 4.17** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 07 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P7-13%
<b>Fecha de ensayo</b>	12/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	13 %
<b>Voltaje</b>	10 kV
<b>Caudal</b>	5 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	23,6 -23,3 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	30,2 - 33,5 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,6 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	20,25 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,52 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,36 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	1 hora y 50 minutos

**Figura 4.31** Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 07



**Ensayo final 08:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.18. Se observa una inyección de la solución polimérica de forma continua y estable, con un hilo de solución inclinado hacia abajo respecto a la horizontal, dando lugar a la generación de un cono de Taylor estable y de buena forma como se muestra en la Figura 4.32. La deposición del material sobre la superficie del colector es buena y eficiente. Esporádicamente se acumula material en la aguja de inyección, por lo tanto, se genera ocasionalmente residuos.

**Tabla 4.18** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 08 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P8-13%
<b>Fecha de ensayo</b>	13/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	13 %
<b>Voltaje</b>	12,5 kV
<b>Caudal</b>	5 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	22,9 - 23,4 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	23,7 - 21,6 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,8 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	20,34 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,43 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,36 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	2 horas

**Figura 4.32** Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 08



**Ensayo final 09:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.19. Se observa una inyección de la solución polimérica esporádicamente inestable debido a la acumulación de material en la aguja de inyección, sin embargo, al estabilizarse la inyección de material se genera de forma inmediata el cono de Taylor y es estable como se muestra en la Figura 4.33. La deposición del material sobre el colector de rodillo es buena y eficiente. Se genera regularmente la acumulación de material en la aguja de inyección, por lo tanto, se genera residuos de forma continua.

**Tabla 4.19** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 09 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 13%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P9-13%
<b>Fecha de ensayo</b>	13/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	13 %
<b>Voltaje</b>	12,5 kV
<b>Caudal</b>	4 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	23,1 - 23,8 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	23,8 - 22,5 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,64 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	20,19 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,44 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,36 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	2 horas y 25 minutos

**Figura 4.33** Inyección de solución polimérica al 13% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 09



**b) Ensayos finales con solución polimérica de concentración 18%(p/v)**

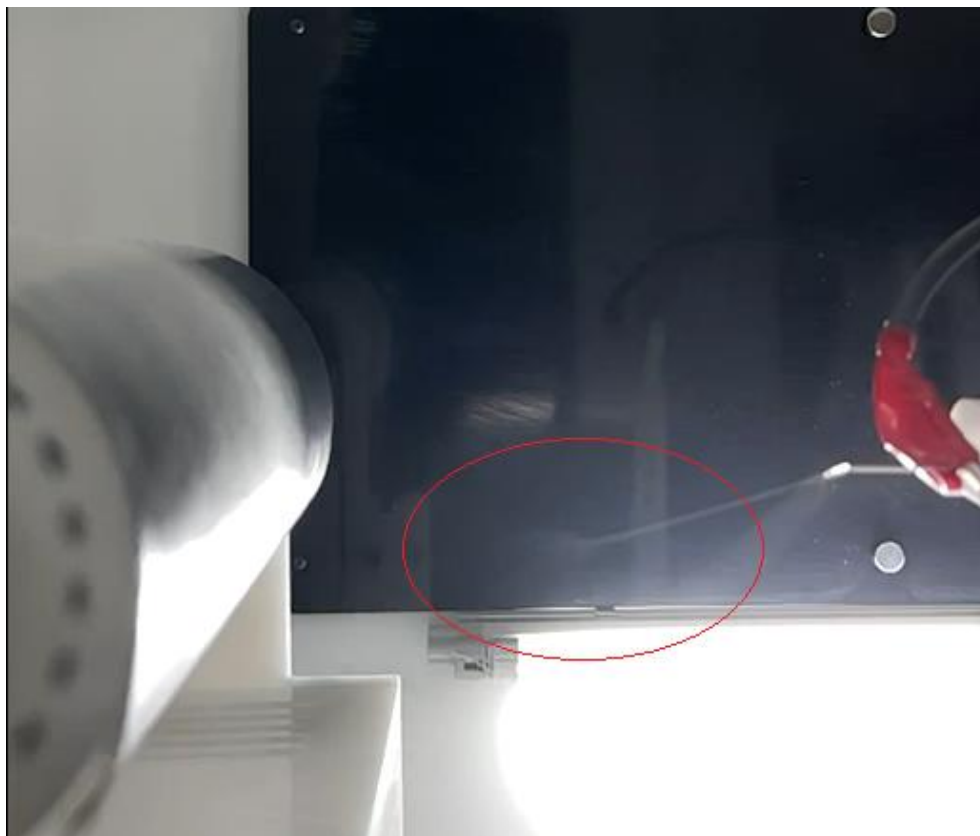
Se realiza un total de 9 ensayos con la solución polimérica a base de PLA que tiene una concentración del 18% (p/v). En esta etapa cada ensayo tiene parámetros operativos distintos que se detallan a continuación.

**Ensayo final 01:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.20. Se observa una inyección de la solución polimérica estable que se inclina hacia abajo respecto a la horizontal y seguido se genera de forma inmediata el cono de Taylor y es estable durante el proceso como se muestra en la Figura 4.34. La deposición del material sobre el colector de rodillo es eficiente. Se genera regularmente la acumulación de material en la aguja de inyección, por lo tanto, se genera residuos de forma continua.

**Tabla 4.20** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 01 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P1-18%
<b>Fecha de ensayo</b>	05/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	18 %
<b>Voltaje</b>	12,5 kV
<b>Caudal</b>	4 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	24 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	20,2 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,59 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	19,83 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,5 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	2 horas y 20 minutos

**Figura 4.34** Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 01



**Ensayo final 02:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.21. Se observa una inyección de la solución polimérica de forma ligeramente inestable cuyo hilo se inclina hacia abajo respecto a la horizontal e inmediatamente se genera el cono de Taylor que es estable como se muestra en la Figura 4.35. La deposición del material sobre la superficie del colector es buena y regularmente se acumula material en la aguja de inyección por lo tanto se genera residuos de forma continua.

**Tabla 4.21** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 02 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P2-18%
<b>Fecha de ensayo</b>	06/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	18 %
<b>Voltaje</b>	12,5 kV
<b>Caudal</b>	5 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	24,4 - 24,2 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	22 - 24 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,6 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	19,77 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,49 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,74 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	1 hora y 54 minutos

**Figura 4.35** Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 02



**Ensayo final 03:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.22. Se observa una inyección de la solución polimérica de forma estable y de forma inmediata se genera el cono de Taylor que muestra estabilidad y buena apariencia durante todo el proceso como se muestra en la Figura 4.36. La deposición del material sobre el colector es buena y eficiente. Se genera poca acumulación de material en la aguja de inyección, por lo tanto, poca generación de residuos.

**Tabla 4.22** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 03 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P3-18%
<b>Fecha de ensayo</b>	07/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	18 %
<b>Voltaje</b>	12,5 kV
<b>Caudal</b>	3 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	24 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	20,4 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,49 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	19,77 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,51 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,7 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	3 horas y 8 minutos

**Figura 4.36** Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 03

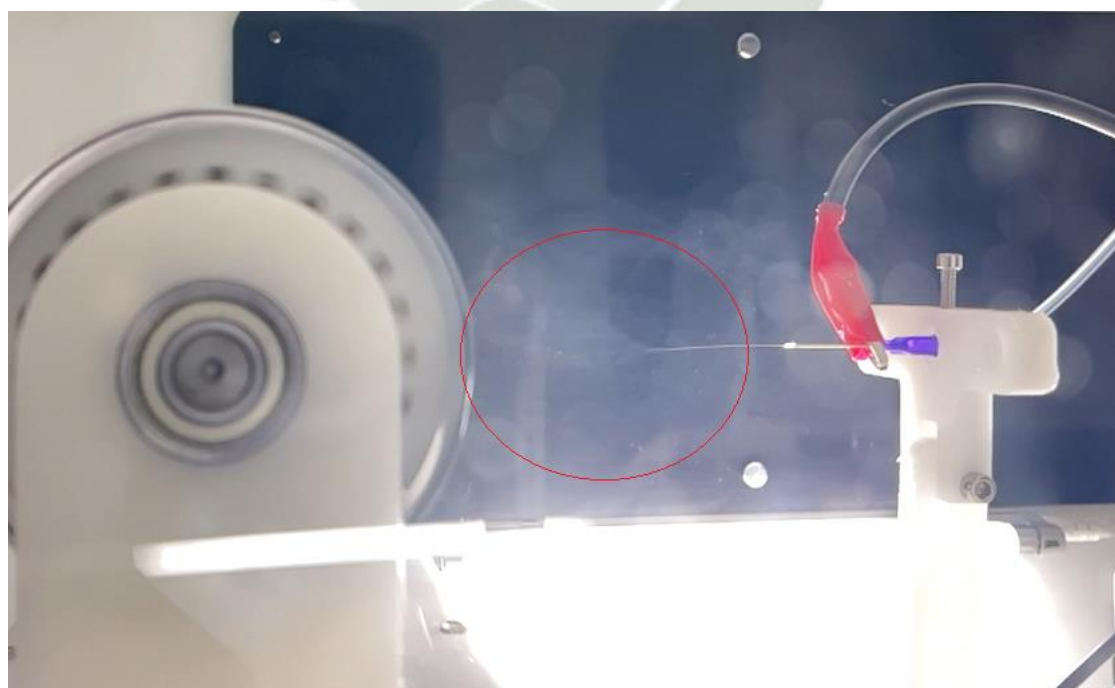


**Ensayo final 04:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.23. Se observa una inyección de la solución polimérica de forma continua que tiende a inclinarse hacia abajo respecto a la horizontal, también se observa el cono de Taylor que se genera después del hilo y se mantiene estable durante el proceso como se muestra en la Figura 4.37. La deposición de material sobre el colector de rodillo es buena y no se genera acumulación de material en la aguja de inyección, por lo tanto, no se genera residuos.

**Tabla 4.23** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 04 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P4-18%
<b>Fecha de ensayo</b>	11/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	18 %
<b>Voltaje</b>	10 kV
<b>Caudal</b>	3 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	19 - 22 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	20 - 21 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,56 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	19,81 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,48 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,76 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	3 horas y 10 minutos

**Figura 4.37** Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 04



**Ensayo final 05:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.24. Se observa una inyección de la solución polimérica de forma estable y ligeramente inclinada hacia abajo respecto a la horizontal, enseguida se forma el cono de Taylor y se mantiene estable durante todo el proceso como se muestra en la Figura 4.38. La deposición del material sobre el colector es eficiente y no se acumula excesivo material sobre la aguja de inyección, por lo tanto, se genera pocos residuos.

**Tabla 4.24** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 05 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P5-18%
<b>Fecha de ensayo</b>	12/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	18 %
<b>Voltaje</b>	7,5 kV
<b>Caudal</b>	3 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	18,9 - 22,9 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	24,5 - 21,5 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,64 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	19,75 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,5 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,7 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	3 horas y 6 minutos

**Figura 4.38** Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 05



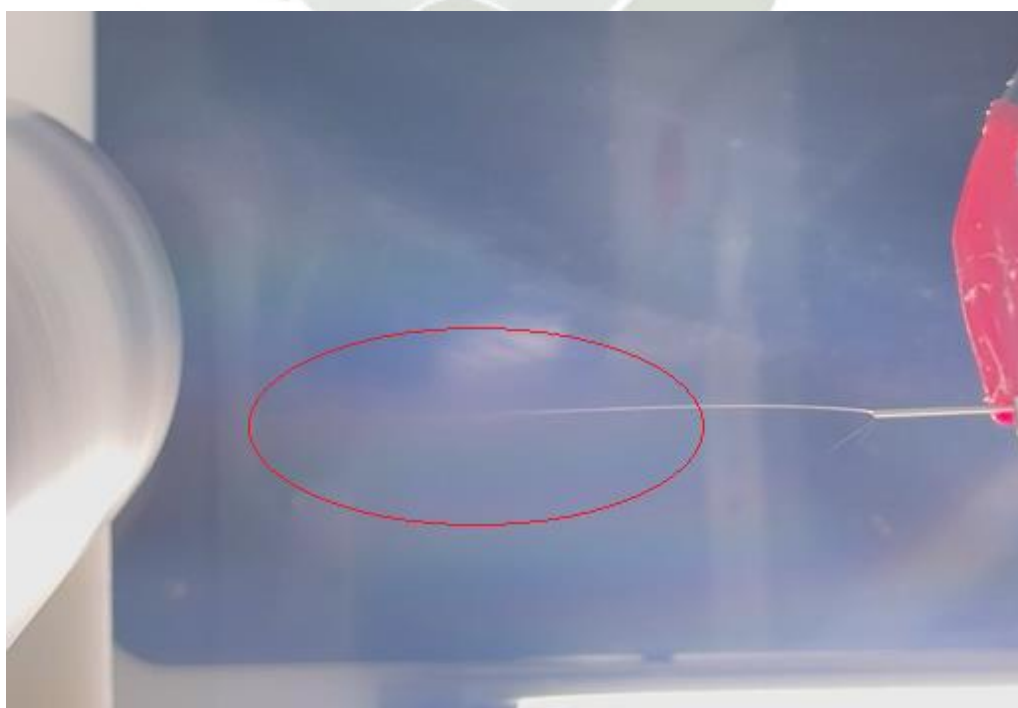
**Ensayo final 06:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.25.

Se observa una inyección de la solución polimérica de forma continua y enseguida la formación del cono de Taylor que se mantiene estable y con buena forma durante todo el proceso como se muestra en la Figura 4.39. La deposición del material sobre el colector es buena y eficiente. Se genera poca acumulación de material en la aguja de inyección, por lo tanto, hay mínimos residuos.

**Tabla 4.25** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 06 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P6-18%
<b>Fecha de ensayo</b>	13/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	18 %
<b>Voltaje</b>	10 kV
<b>Caudal</b>	4 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	18,4 - 22,1 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	23 - 24,4 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,65 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	19,79 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,51 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,81 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	2 horas y 24 minutos

**Figura 4.39** Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 06



**Ensayo final 07:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.26. Se observa una inyección del material polimérico de forma continua, donde el hilo se inclina hacia abajo respecto a la horizontal enseguida se genera el cono de Taylor y se mantiene estable durante todo el proceso como se muestra en la Figura 4.40. La deposición del material sobre el colector de rodillo es eficiente y no se muestra excesiva acumulación de material sobre la aguja de inyección, por lo tanto, hay poca generación de residuos.

**Tabla 4.26** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 07 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P7-18%
<b>Fecha de ensayo</b>	13/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	18 %
<b>Voltaje</b>	10 kV
<b>Caudal</b>	5 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	22,1 - 22,4 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	24,4 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,52 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	19,62 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,5 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,86 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	1 hora y 53 minutos

**Figura 4.40** Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 07

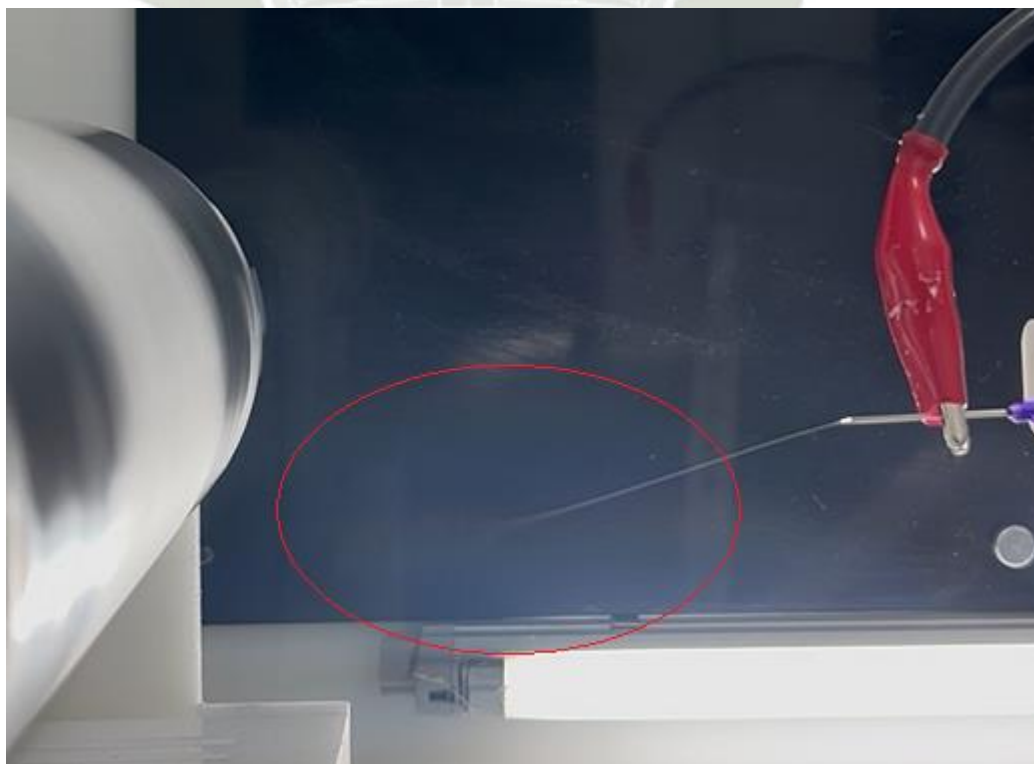


**Ensayo final 08:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.27. Se observa una inyección del material polimérico de forma continua pero inclinado hacia abajo respecto a la horizontal, enseguida se genera el cono de Taylor y se mantiene constante durante el proceso como se muestra en la Figura 4.41. La deposición del material sobre el colector es buena y no se muestra excesiva acumulación de material en la aguja de inyección, por lo tanto, hay poca generación de residuos.

**Tabla 4.27** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 08 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18% (p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P8-18%
<b>Fecha de ensayo</b>	14/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	18 %
<b>Voltaje</b>	7,5 kV
<b>Caudal</b>	4 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	20 - 23,3 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	18,4 - 18,8 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,54 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	19,37 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,51 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,71 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	2 horas y 20 minutos

**Figura 4.41** Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 08



**Ensayo final 09:** Se ensaya 10 mL de solución polimérica cuyos parámetros y condiciones operativas se detallan en la Tabla 4.28. Se observa una inyección de la solución polimérica de forma estable y continua pero inclinada hacia abajo respecto a la horizontal, enseguida se genera el cono de Taylor que muestra bastante estabilidad y buen aspecto durante el proceso como se muestra en la Figura 4.42. La deposición del material sobre la superficie del colector es muy eficiente. Se genera mínima acumulación de material en la aguja de inyección, por lo tanto, la generación de residuos es mínima en este proceso.

**Tabla 4.28** Descripción de los parámetros operativos del ensayo final 09 con solución polimérica a base de PLA a una concentración del 18%(p/v)

<b>Etiqueta de muestra</b>	P9-18%
<b>Fecha de ensayo</b>	14/09/2023
<b>Concentración de solución de PLA</b>	18 %
<b>Voltaje</b>	7,5 kV
<b>Caudal</b>	5 mL/h
<b>Calibre de aguja</b>	21G (0,8 mm)
<b>Distancia de inyección</b>	100 mm
<b>Velocidad de giro del colector</b>	300 RPM
<b>Velocidad desplazamiento lateral</b>	300 mm/min
<b>Temperatura de cámara</b>	23,3 - 23,8 °C
<b>Humedad relativa del ensayo</b>	18,8 - 22,2 %
<b>Ventilación de cámara</b>	Encendida
<b>Peso inicial de jeringa vacía</b>	6,46 gramos
<b>Peso final de jeringa con 10ml</b>	19,49 gramos
<b>Peso inicial de papel aluminio</b>	1,47 gramos
<b>Peso final de papel aluminio</b>	2,76 gramos
<b>Tiempo de inyección</b>	1 hora y 51 minutos

**Figura 4.42** Inyección de solución polimérica al 18% (p/v) y formación de cono de Taylor en proceso de electrohilado del ensayo final 09



#### 4.2.3. Selección de membranas obtenidas de ensayos finales

La selección de membranas está enfocada en realizar una evaluación de las membranas obtenidas en los 18 ensayos finales, y de esta forma seleccionar las 6 muestras más representativas para que sean estudiadas y caracterizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Y así poder evaluar mediante esta técnica el diámetro, la disposición y el entrelazamiento de las nanofibras que conforman la estructura interna de las membranas de PLA

Para la selección final de las 6 membranas más representativas primero se evalúa de forma visual todos los resultados obtenidos en los 18 ensayos finales detallados en el apartado 4.2.2. "Ejecución de ensayos finales de electrohilado" de esta investigación. Estas muestras se subdividen a su vez en dos secciones de acuerdo con la concentración de la solución polimérica que posean, ya sea del 13% (p/v) o 18%(p/v) como se muestra en la Figura 4.43.

**Figura 4.43** Membranas obtenidas de ensayos finales y catalogadas

La primera evaluación es la inspección física donde se evalúa la calidad de la textura superficial de las membranas usando el tacto directo con los dedos. Aquí se obtiene un resultado donde se concluye que las 18 muestras tienen una textura superficial no excesivamente plastificada y que va acorde a la investigación.

La segunda evaluación es hacer una selección de acuerdo con las condiciones operativas y el desempeño del proceso de electrohilado de cada uno de los ensayos finales detallados anteriormente en el apartado 4.2.2 de esta investigación. En esta evaluación se concluye que el mejor comportamiento respecto al proceso de electrohilado en donde hay una buena generación y estabilidad del cono de Taylor, eficiente deposición de material sobre el colector y poca generación de residuos se encuentra en los siguientes ensayos mostrados en la Tabla 4.29:

**Tabla 4.29** Ensayos finales con mejor desempeño operativo

	Concentración de la solución	Etiqueta de la muestra	Voltaje	Caudal
1	13%	P4-13%	7,5 kV	5 mL/h
2	13%	P6-13%	10 kV	4 mL/h
3	13%	P8-13%	12,5 kV	5 mL/h
4	18%	P3-18%	12,5 kV	3 mL/h
5	18%	P6-18%	10 kV	4 mL/h
6	18%	P9-18%	7,5 kV	5 mL/h

Los ensayos detallados en la Tabla 4.29 se definen como las 6 muestras más representativas entre los 18 ensayos finales. Estas membranas pasan a la siguiente etapa de caracterización mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para hacer un estudio más profundo de su estructura interna.

#### 4.2.4. Caracterización de las membranas seleccionadas

La caracterización de las 6 membranas seleccionadas que son las más representativas y que están detalladas en el apartado 4.23 de esta investigación, se realiza mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) del modelo EVO 10MA de Carl Zeiss.

Este dispositivo, recubierto con oro-paladio, opera en modo alto vacío a 20 kV. La elección de esta configuración es por la necesidad de lograr una caracterización morfológica precisa y detallada de la estructura interna de las membranas.

La aplicación de la capa de oro-paladio posibilita una mejora en la conductividad eléctrica durante la evaluación, garantizando la obtención de imágenes de alta resolución y reduciendo al mínimo la carga superficial.

La función de alto vacío es fundamental para preservar la integridad de las nanofibras sensibles durante la observación.

La elección de un voltaje de 20 kV facilita la penetración del haz de electrones, esto permite revelar con exactitud la morfología y la distribución de tamaños de las nanofibras.

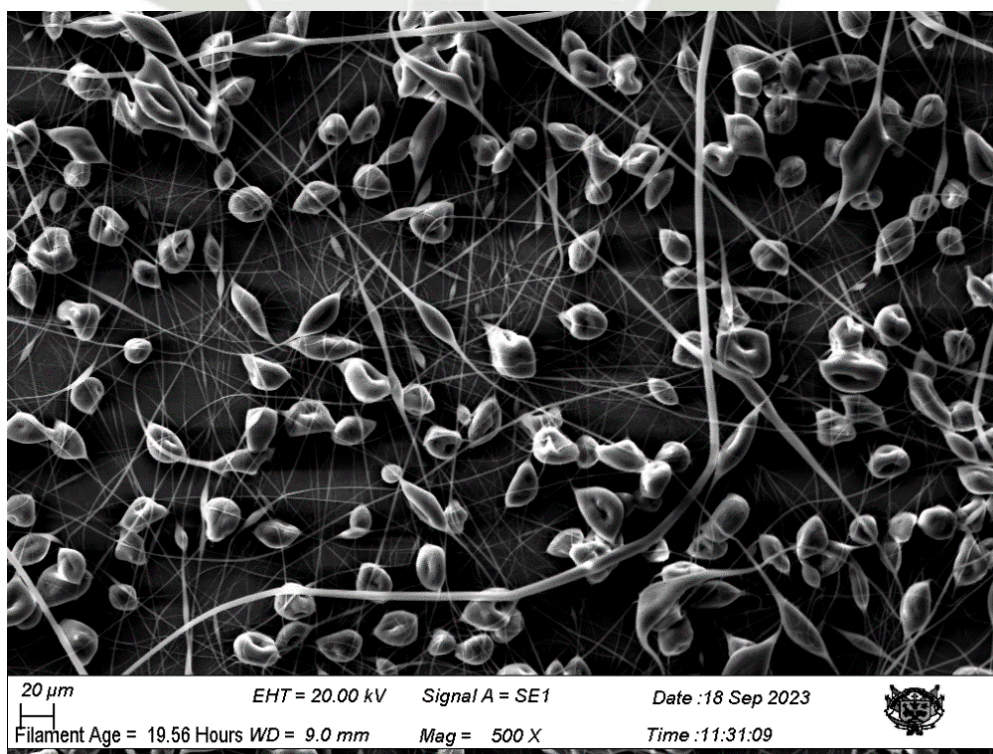
El conjunto de todas estas condiciones ideales permite a esta investigación realizar una caracterización exhaustiva de las nanofibras, proporcionando información valiosa acerca de su estructura a escala nanométrica. A continuación, se detalla los resultados obtenidos de la caracterización de las 6 membranas seleccionadas detalladas en la Tabla 4.29, considerando en cuanto a la morfología y entrelazamiento de las fibras en su estructura interna, el diámetro de las fibras y posibles defectos.

#### a) Membrana 01

Esta membrana lleva la etiqueta "P4-13%" y se obtiene a partir de una solución polimérica a base de PLA con una concentración del 13% (p/v).

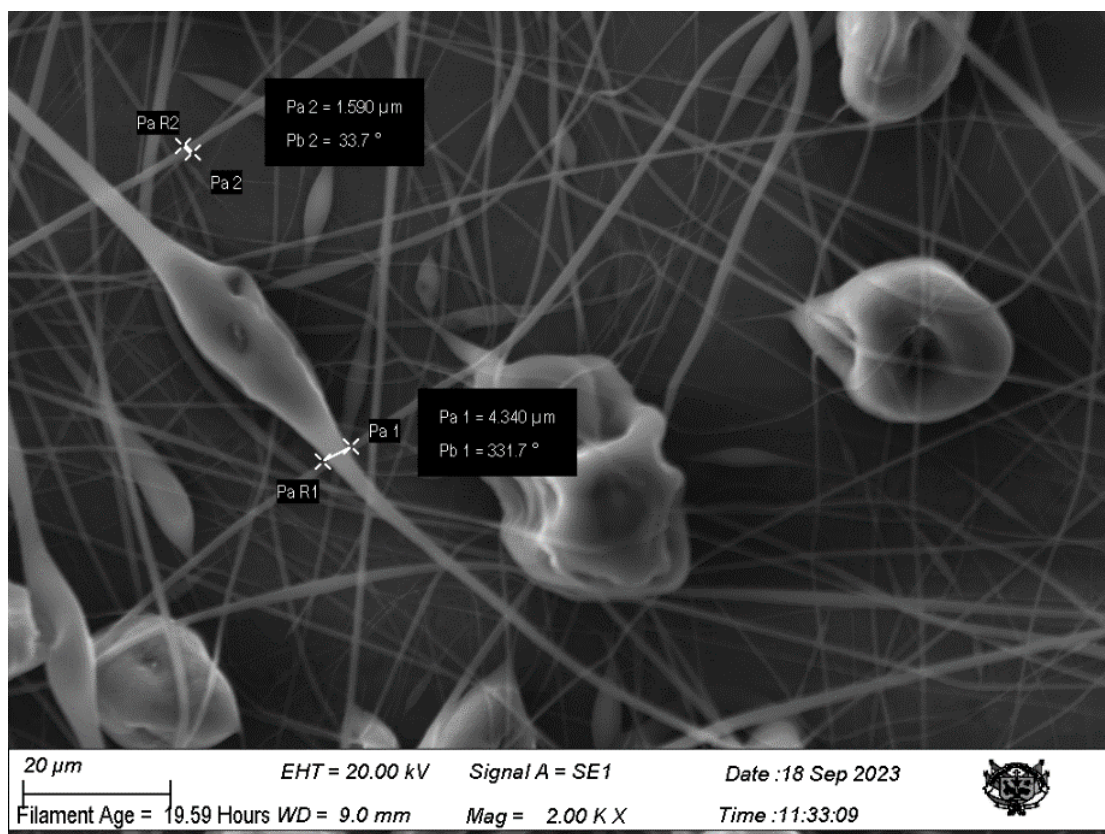
En la Figura 4.44 se observa los resultados obtenidos de la muestra evaluada con el microscopio electrónico de barrido (SEM) a una magnificación de 500X que permite ver la estructura interna de la membrana a una escala de 20 micrómetros donde se visualiza un entrelazamiento de nanofibras en todas las direcciones con aparente forma de malla con inclusiones granulares alrededor de toda la superficie de la membrana.

**Figura 4.44** Estructura interna de membrana P4-13% a una magnificación de 500X



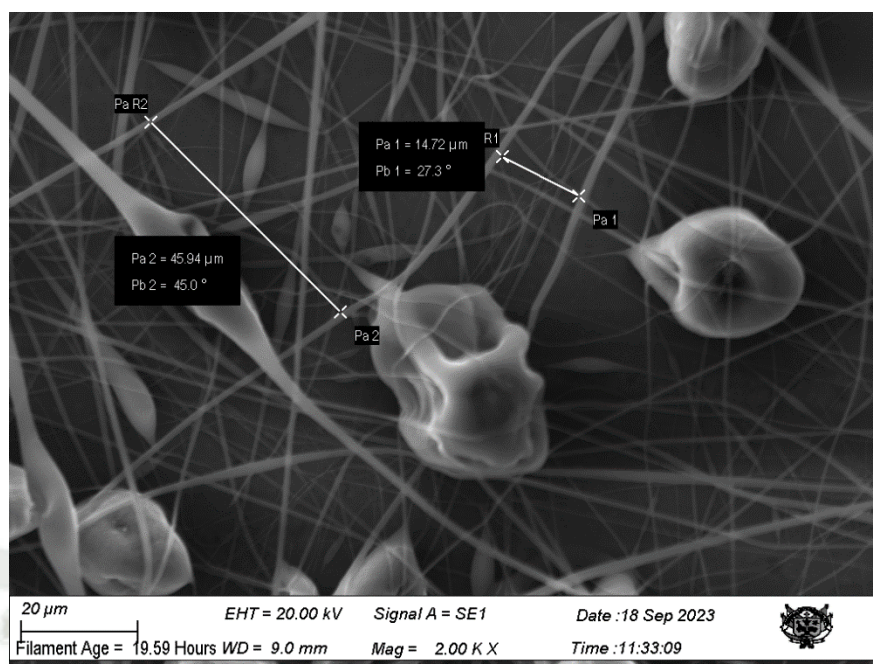
En la Figura 4.45 se muestra la membrana “P4-13%” a una magnificación de 2000X donde se puede identificar un diámetro mínimo de fibra de 1590 nanómetros etiquetado en la Figura como “Pa 2” y un diámetro máximo de fibra de 4340 nanómetros etiquetado como “Pa 1”.

**Figura 4.45** Diámetro de las nanofibras de la estructura de membrana P4-13%



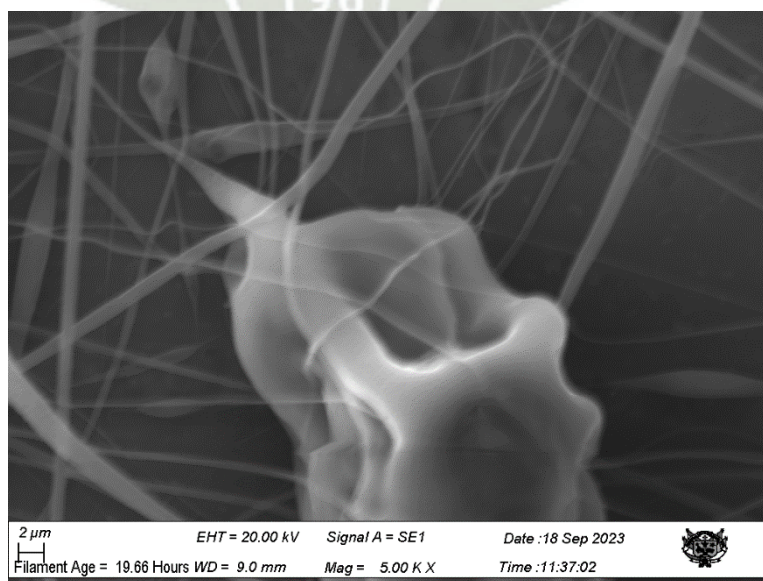
En la Figura 4.46 se muestra la membrana “P4-13%” a una magnificación de 2000X que revela datos sobre la separación lineal entre las nanofibras, donde se observa un valor mínimo de separación de 14,72 micrómetros y un valor máximo de 45,94 micrómetros.

**Figura 4.46** Separación lineal entre nanofibras en estructura de membrana P4-13%



En la Figura 4.47 se muestra la membrana “P4-13%” a una magnificación a 5000X donde se puede observar a mayor detalle el entrelazamiento en todas las direcciones que han adoptado las nanofibras de PLA para conformar la estructura interna de la membrana obtenida del proceso de electrohilado. Sin embargo, se puede ver defectos como la inclusión granular en la estructura interna de la membrana.

**Figura 4.47** Morfología y entrelazamiento de las nanofibras en membrana P4-13%

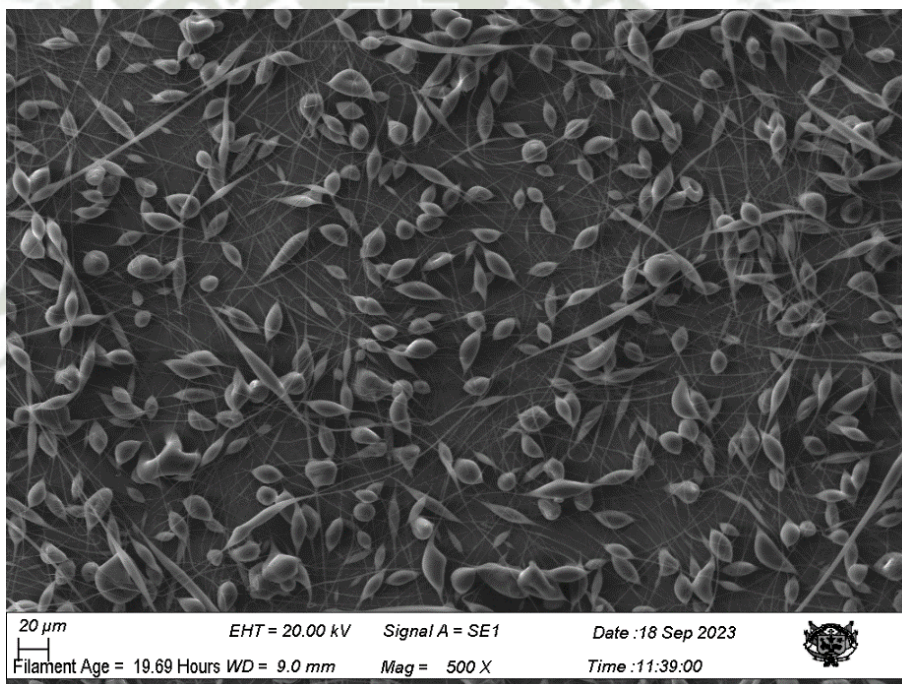


**b) Membrana 02**

Esta membrana lleva la etiqueta “P6-13%” y se obtiene a partir de una solución polimérica con una concentración del 13% (p/v).

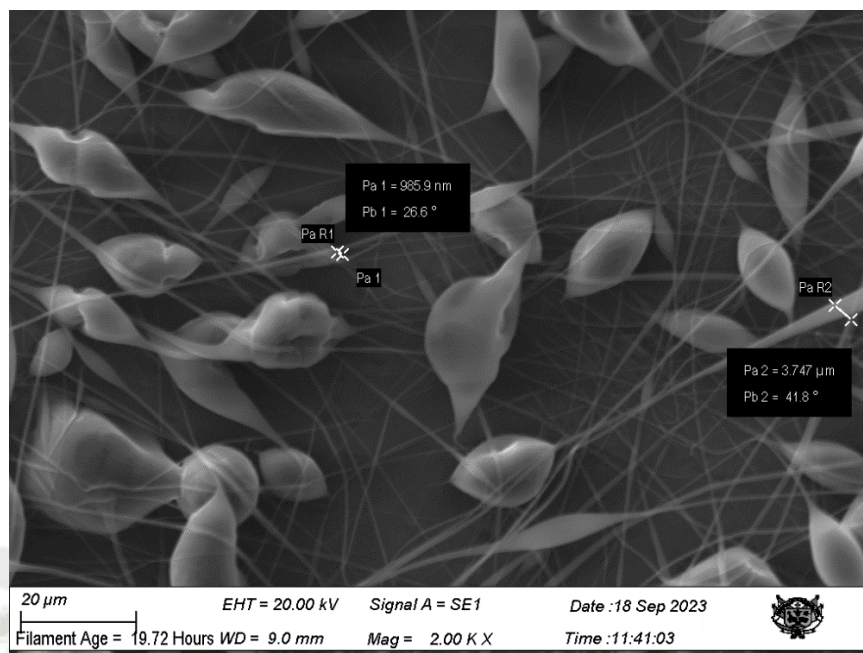
La Figura 4.48 muestra la imagen obtenida con apoyo del microscopio electrónico de barrido (SEM) a una magnificación de 500X que permite ver la estructura interna de la membrana donde se puede observar la morfología y el entrelazamiento de nanofibras en todas las direcciones con aparente forma de malla, también se observa inclusión granular alrededor de toda la superficie que conforma la membrana.

**Figura 4.48** Estructura interna de membrana P6-13% a una magnificación de 500X



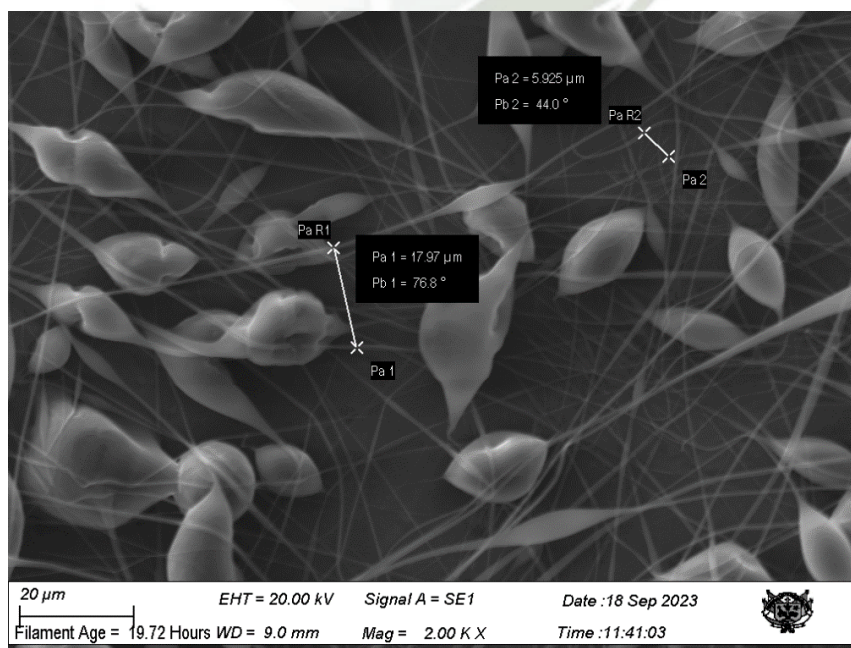
En la Figura 4.49 se muestra la membrana “P6-13%” a una magnificación de 2000X donde se puede identificar diámetro mínimo etiquetado como Pa1 de las nanofibras con un valor de 985,9 nanómetros y el diámetro máximo etiquetado como Pa2 con un valor de 3747 nanómetros.

**Figura 4.49** Diámetro de las nanofibras en estructura de membrana P6-13%



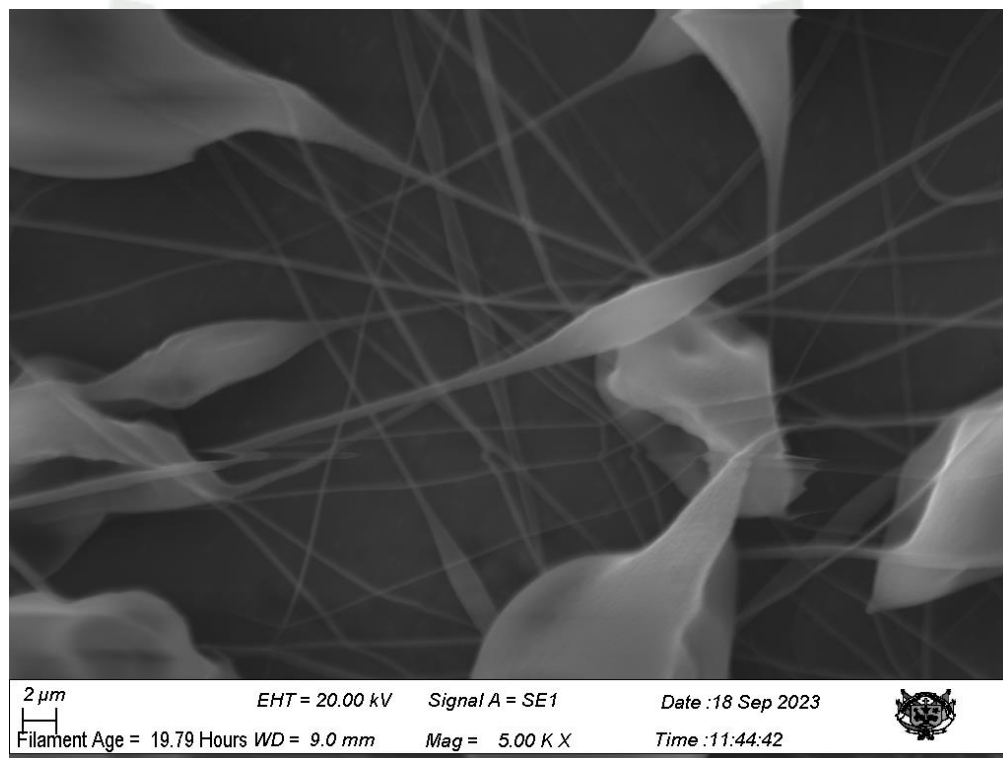
En la Figura 4.50 se muestra la membrana “P6-13%” a una magnificación de 2000X que muestra la separación lineal entre las nanofibras que conforman la estructura interna de la membrana, donde se tiene un valor mínimo de 5,925 micrómetros y un valor máximo de 17,97 micrómetros.

**Figura 4.50** Separación lineal de las nanofibras en membrana P6-13%



En la Figura 4.51 se muestra la membrana “P6-13%” a una magnificación de 5000X donde se observa a mayor detalle la morfología y el entrelazamiento en todas las direcciones con una aparente forma enmallada que han adoptado las nanofibras de PLA para conformar la estructura interna de esta membrana. También se logra ver a mayor detalle la inclusión granular que afecta las nanofibras que conforman la membrana.

**Figura 4.51** Morfología y entrelazamiento de las nanofibras en membrana P6-13%

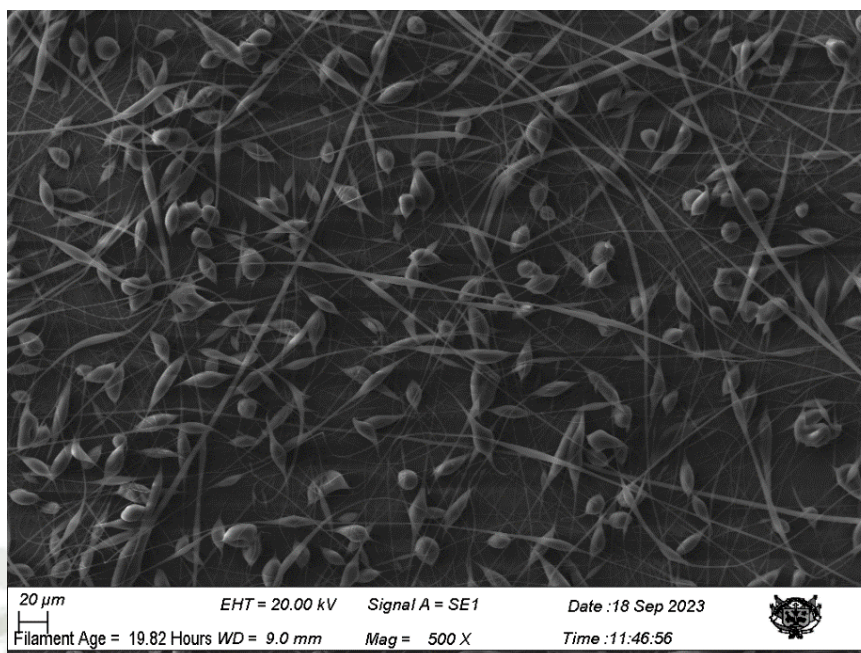


### c) Membrana 03

Esta membrana lleva la etiqueta “P8-13%” y se obtiene del proceso de electrohilado usando una solución polimérica a base de PLA con una concentración de 13%(p/v).

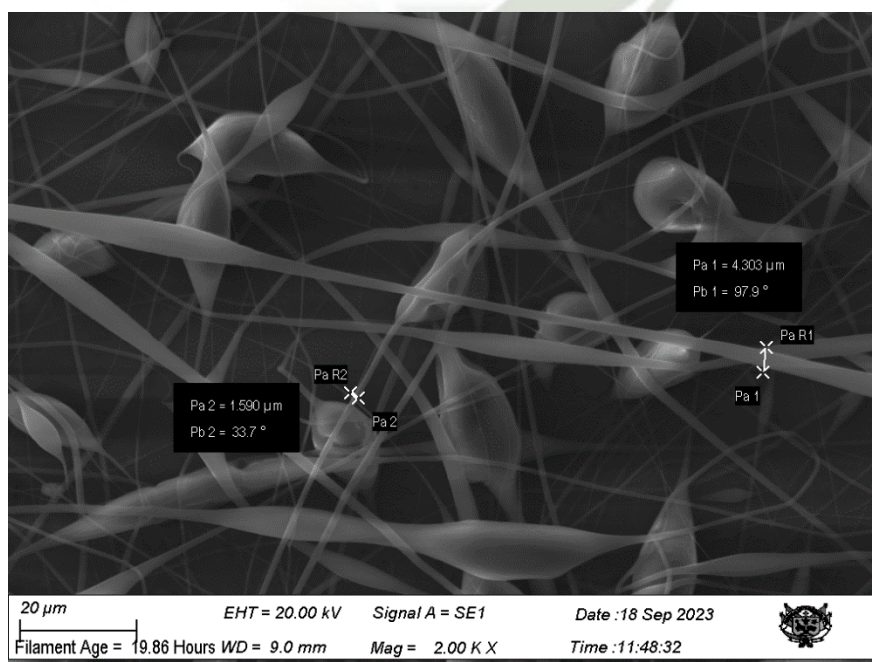
La Figura 4.52 es obtenida con el apoyo del microscopio electrónico de barrido (SEM) y muestra la membrana a una magnificación de 500X donde se puede observar la morfología y el entrelazamiento de nanofibras en todas las direcciones con aparente forma de malla que conforman la estructura interna de la membrana, así mismo, defectos como la inclusión granular en toda la superficie de ésta.

**Figura 4.52** Estructura interna de membrana P8-13%



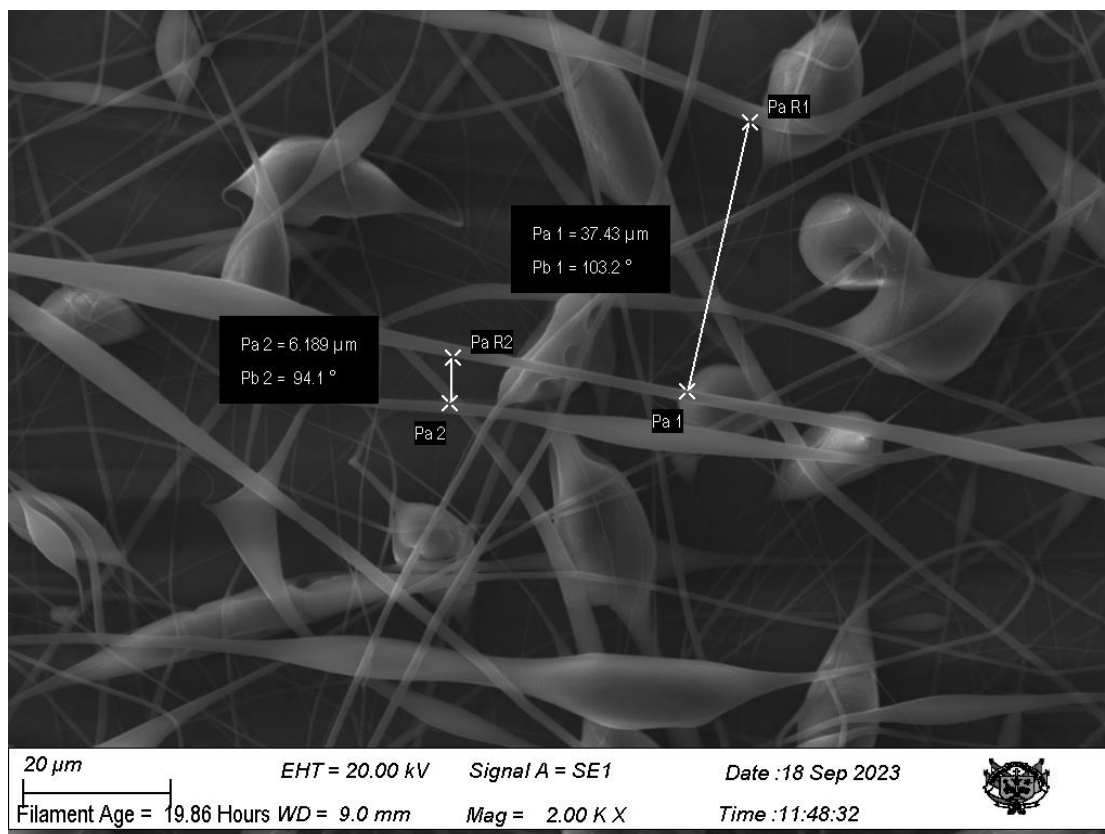
En la Figura 4.53 se muestra la membrana “P8-13%” a una magnificación de 2000X donde se puede observar un diámetro mínimo de fibra con un valor de 1590 nanómetros etiquetado como Pa2 y un diámetro máximo de fibra con un valor de 4303 nanómetros etiquetado como Pa1.

**Figura 4.53** Diámetro de las nanofibras de la estructura de membrana P8-13%

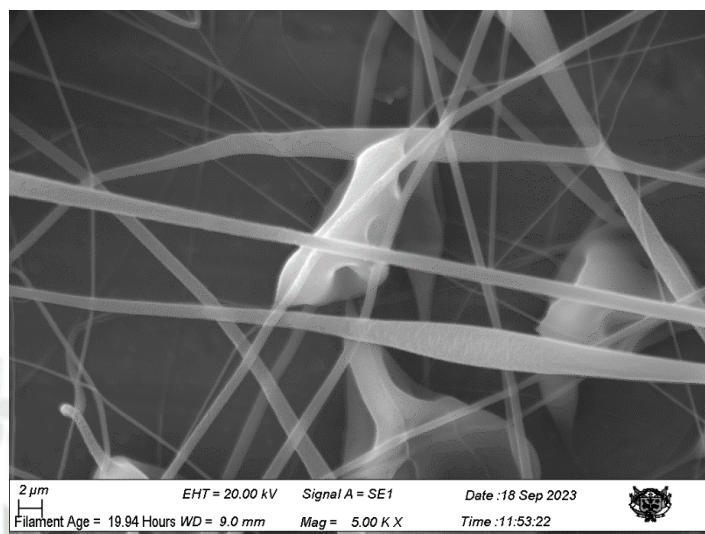


En la Figura 4.54 se muestra la membrana “P8-13%” a una magnificación de 2000X donde se observa los valores de separación lineal entre las fibras de la membrana, con un valor mínimo de 6,189 micrómetros y un valor máximo de 37,43 micrómetros.

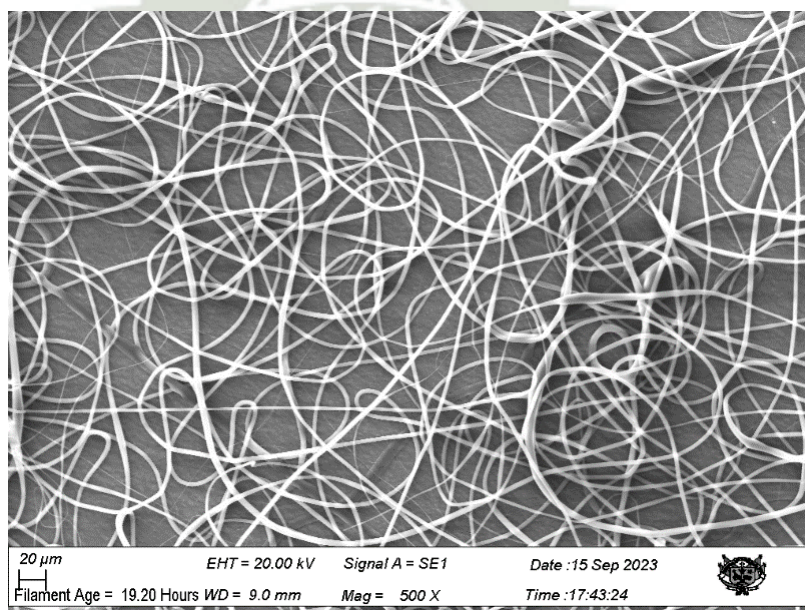
**Figura 4.54** Separación lineal entre nanofibras en estructura de membrana P8-13%



En la Figura 4.55 se muestra la membrana “P8-13%” a una magnificación de 5000X, donde se observa a mayor detalle la morfología y el entrelazamiento en todas las direcciones con aparente forma de malla que han adoptado las nanofibras para conformar la estructura interna de la membrana, así mismo, se muestran algunos defectos de inclusión granular a lo largo de las nanofibras.

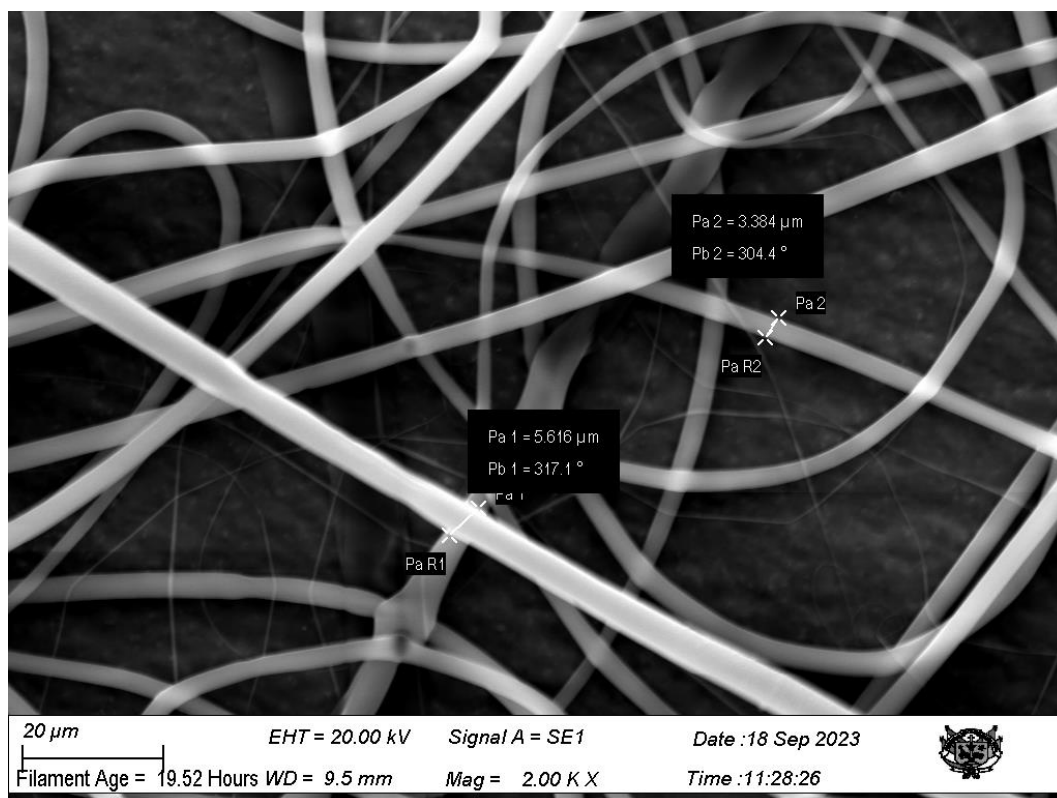
**Figura 4.55** Morfología y entrelazamiento de las nanofibras en membrana P8-13%**d) Membrana 04**

Esta membrana lleva la etiqueta “P3-18%” y se obtiene del proceso de electrohilado usando una solución polimérica a base de PLA con una concentración de 18%(p/v). La Figura 4.56 es obtenida con el apoyo del microscopio electrónico de barrido (SEM) y muestra la membrana a una magnificación de 500X donde se puede ver la morfología y el entrelazamiento de las nanofibras en forma de mallas para conformar la estructura interna de la membrana. No se observa defectos visibles.

**Figura 4.56** Estructura interna de membrana P3-18%

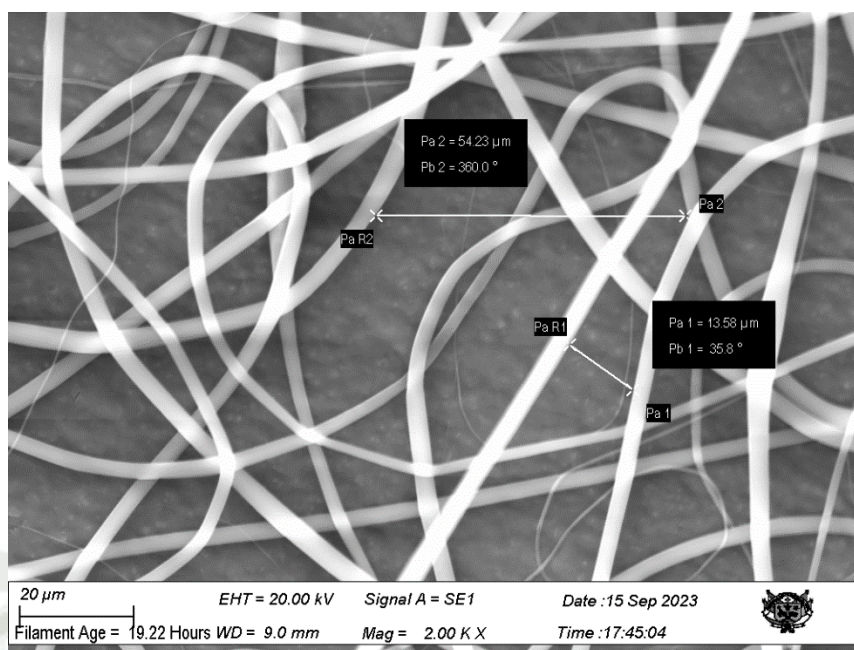
En la Figura 4.57 se muestra la membrana “P3-18%” a una magnificación de 2000X donde se puede identificar los diámetros de las nanofibras. Se observa un diámetro mínimo con un valor de 3384 nanómetros etiquetado como Pa2y un diámetro máximo con un valor de 5616 nanómetros etiquetado como Pa1.

**Figura 4.57** Diámetro de las nanofibras de la estructura de membrana P3-18%



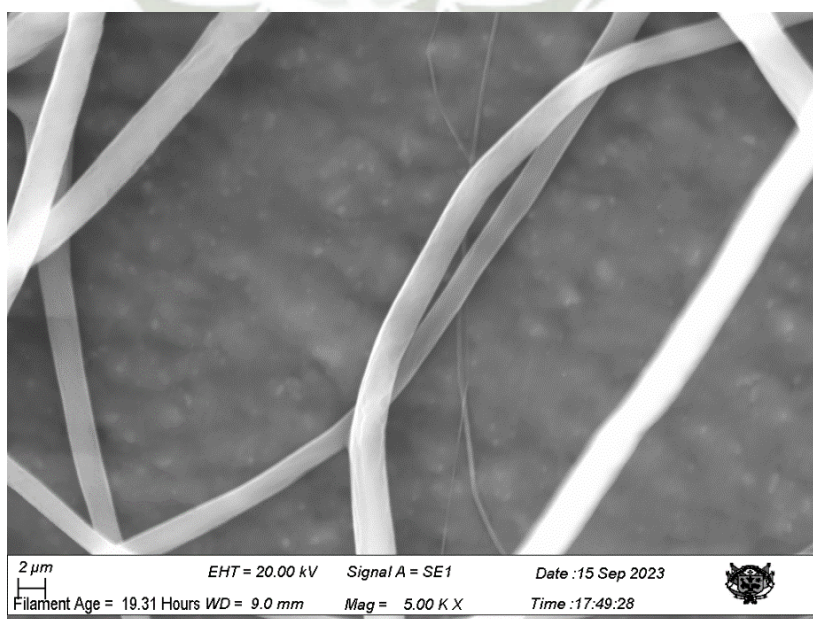
En la Figura 4.58 se muestra la membrana “P3-18%” a una magnificación de 2000X donde se muestra los valores de la separación lineal entre las nanofibras que conforman la estructura interna de la membrana, donde el valor mínimo es de 13,58 micrómetros, y el valor máximo es de 54,23 micrómetros.

**Figura 4.58** Separación lineal entre nanofibras en estructura de membrana P3-18%



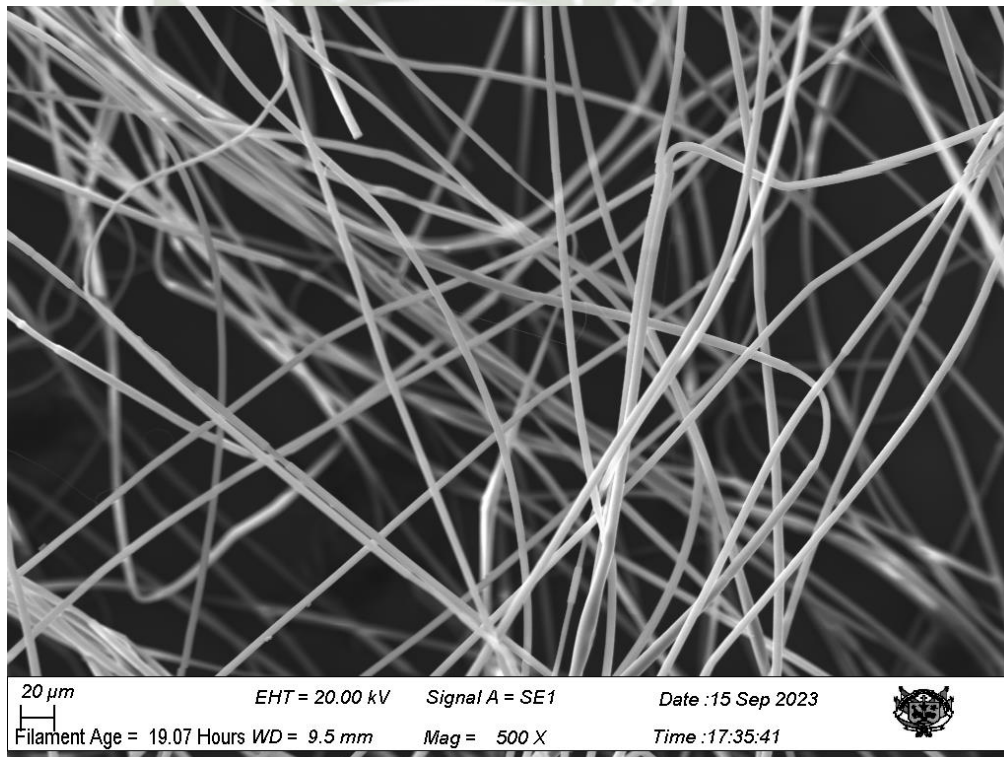
En la Figura 4.59 se muestra la membrana “P3-18%” a una magnificación de 5000X, donde se observa a mayor detalle la morfología y el entrelazamiento de las nanofibras en forma de malla que conforman la estructura interna de la membrana. Así mismo, no se observa defectos visibles a lo largo de las nanofibras.

**Figura 4.59** Morfología y entrelazamiento de las nanofibras en membrana P3-18%



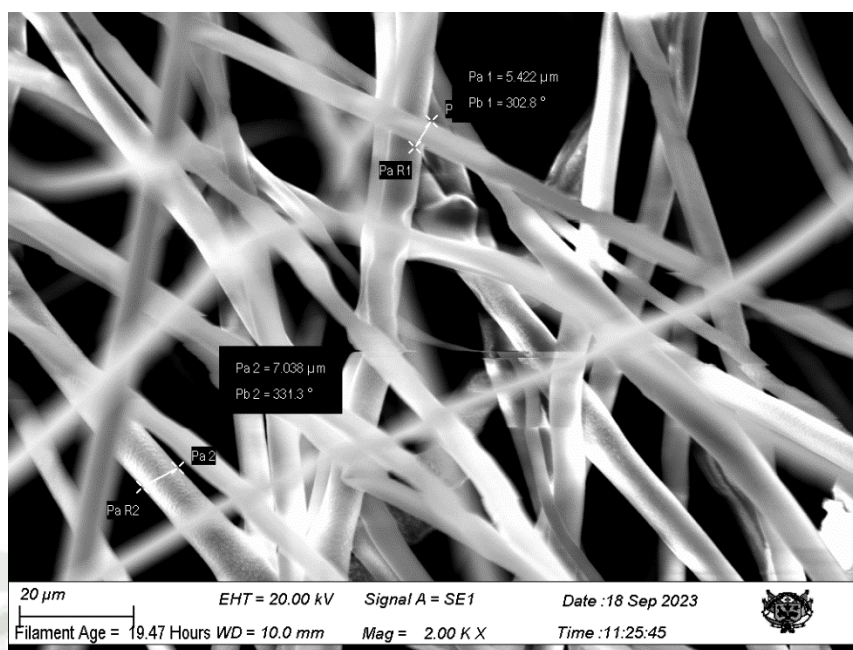
**e) Membrana 05**

Esta membrana lleva la etiqueta “P6-18%” y se obtiene del proceso de electrohilado usando una solución polimérica a base de PLA con una concentración de 18%(p/v). La Figura 4.60 es obtenida con el apoyo del microscopio electrónico de barrido (SEM) y muestra la membrana a una magnificación de 500X donde se puede ver la morfología y el entrelazamiento en todas las direcciones de las nanofibras, que están ligeramente trenzadas. No se observa defectos visibles alrededor de toda la superficie que conforma la estructura interna de la membrana.

**Figura 4.60** Estructura interna de membrana P6-18%

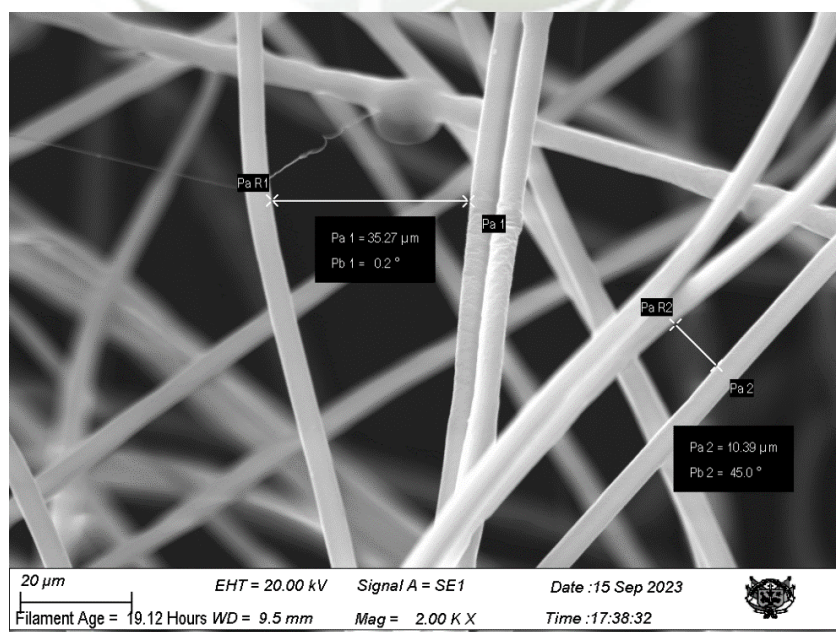
En la Figura 4.61 se muestra la membrana “P6-18%” a una magnificación de 2000X, donde se puede identificar los diámetros de las nanofibras que conforman la estructura interna de la membrana, donde el valor mínimo es de 5422 nanómetros y un valor máximo de 7038 nanómetros. También se observa a mayor detalle la estructura trenzada que han adoptado las fibras. No se observa defectos visibles en la estructura interna de la membrana.

**Figura 4.61** Diámetro de las nanofibras de la estructura de membrana P6-18%



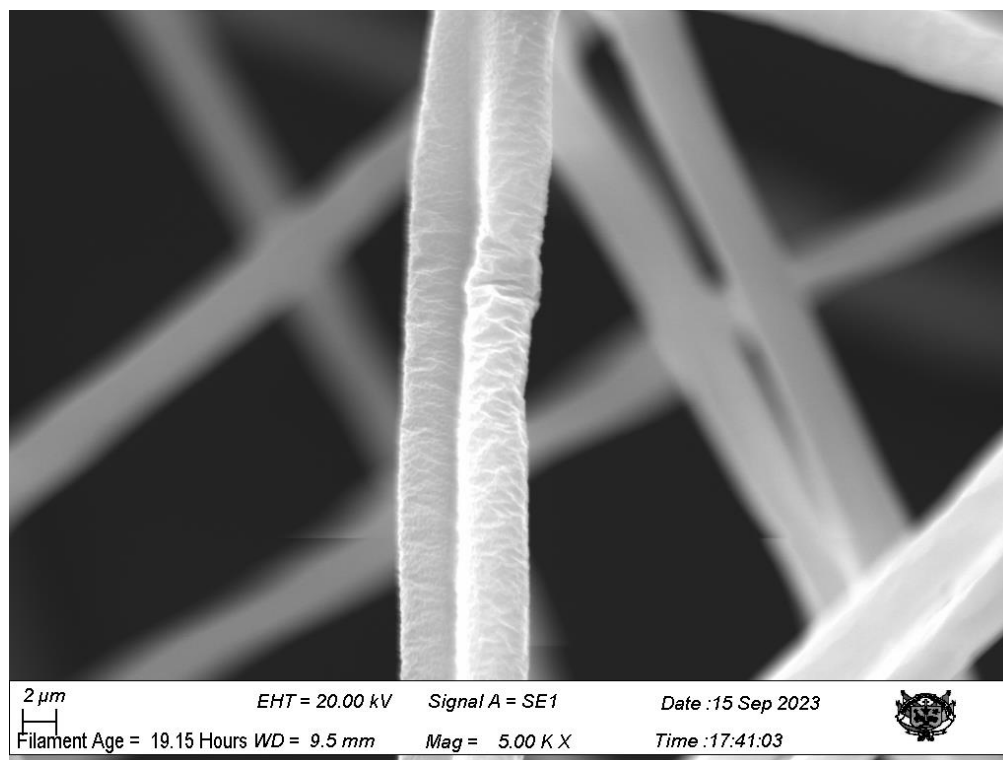
En la Figura 4.62 se muestra la membrana “P6-18%” a una magnificación de 2000X, donde se identifica la separación lineal entre las nanofibras que conforman la estructura interna de la membrana, con un valor mínimo de 10,39 micrómetros y un valor máximo de 35,27 micrómetros.

**Figura 4.62** Separación lineal entre nanofibras en estructura de membrana P6-18%



En la Figura 4.63 se muestra la membrana “P6-18%” a una magnificación de 5000X, donde se muestra a mayor detalle la estructura de las nanofibras de la membrana, aquí se puede identificar una superficie ligeramente rugosa sin porosidades, tampoco muestra algún tipo de inclusión granular a lo largo de toda la nanofibra.

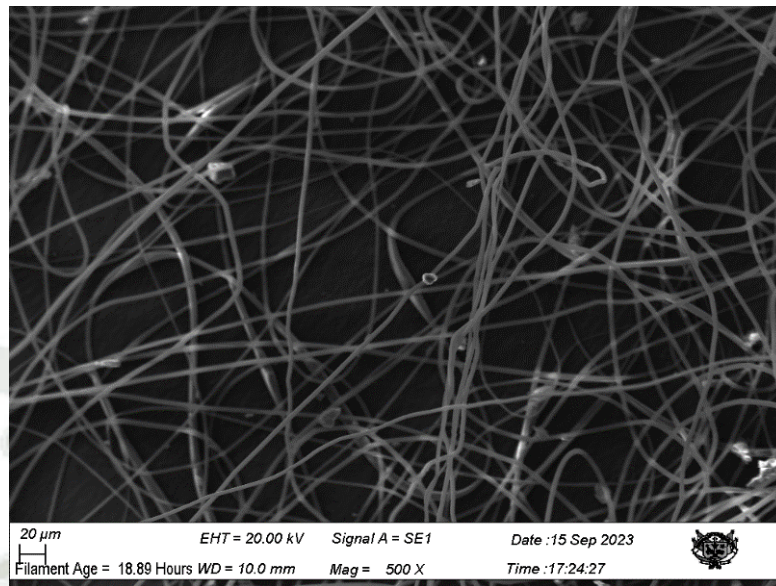
**Figura 4.63** Morfología de las nanofibras en membrana P6-18%



#### f) Membrana 06

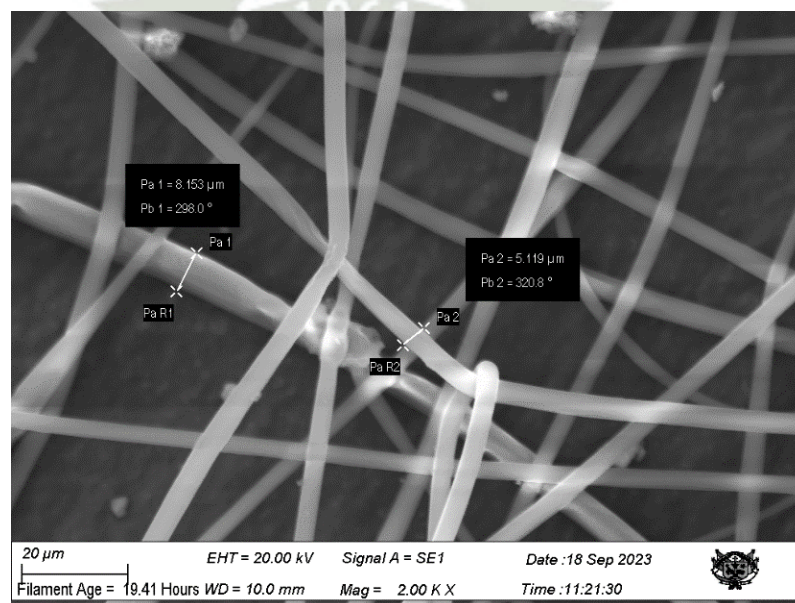
Esta membrana lleva la etiqueta “P9-18%” y se obtiene del proceso de electrohilado usando una solución polimérica a base de PLA con una concentración de 18%(p/v). La Figura 4.64 es obtenida con el apoyo del microscopio electrónico de barrido (SEM) y muestra la membrana a una magnificación de 500X donde se puede ver la morfología y el entrelazamiento de las nanofibras en forma de mallas, que están ligeramente trenzadas. Se observa mínimos defectos de inclusión granular en la estructura interna de la membrana.

**Figura 4.64** Estructura interna de membrana P9-18%



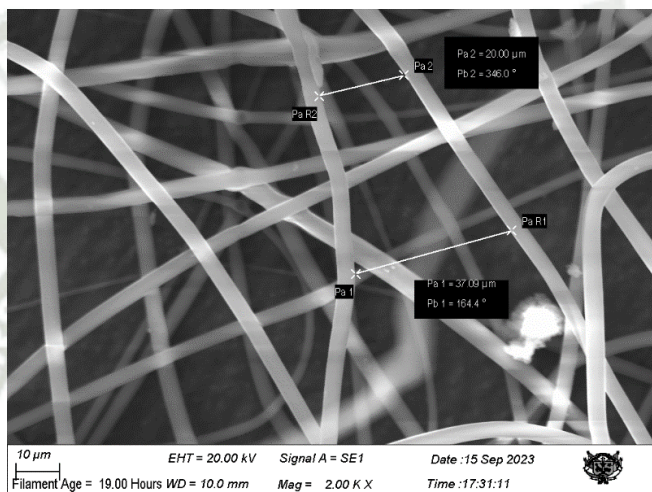
En la Figura 4.65 se muestra la membrana “P9-18%” a una magnificación de 2000X, donde se puede identificar los diámetros de las nanofibras que conforman la estructura interna de la membrana, con un valor mínimo de 5119 nanómetros etiquetado como Pa2 y un valor máximo de 8153 nanómetros etiquetado como Pa1. También se observa a mayor detalle la morfología y el entrelazamiento de las nanofibras que muestran un ligero trenzado, así mismo, se puede identificar pocos defectos de inclusión granular.

**Figura 4.65** Diámetro de las nanofibras de la estructura de membrana P9-18%



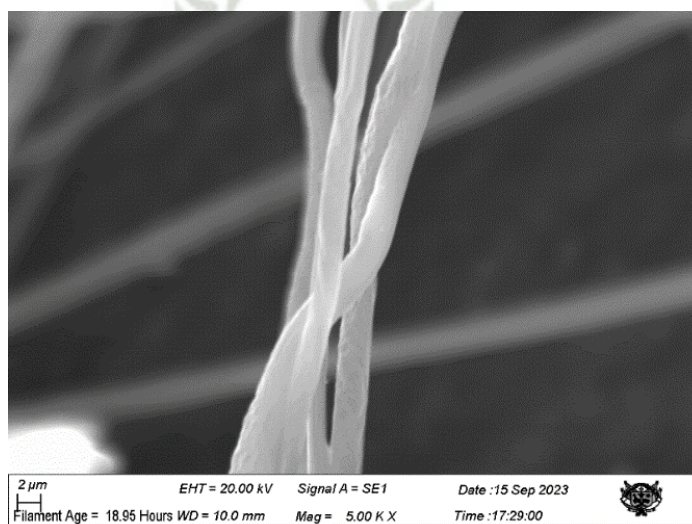
En la Figura 4.66 se muestra la membrana “P9-18%” a una magnificación de 2000X, donde se puede identificar la separación lineal entre las nanofibras que conforman la estructura interna de la membrana, con un valor mínimo de 20 micrómetros y un valor máximo de 37,09 micrómetros. Se observa a mayor detalle el entrelazamiento de las nanofibras en forma de malla.

**Figura 4.66** Separación lineal entre nanofibras en estructura de membrana P9-18%



En la Figura 4.67 se muestra la membrana “P9-18%” a una magnificación de 5000X hasta una escala de 2 micrómetros, donde se identifica claramente un trenzado helicoidal entre las nanofibras que conforman la membrana. No se observa defectos de inclusión granular ni porosidades a lo largo de las nanofibras.

**Figura 4.67** Trenzado helicoidal entre nanofibras de membrana P9-18%



## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1. Morfología y entrelazamiento de las nanofibras

La evaluación de la morfología y el entrelazamiento de las nanofibras que conforman la estructura interna de la membrana se realiza en base al análisis de las imágenes proporcionadas por el microscopio electrónico de barrido (SEM), Estas imágenes son tomadas de las 6 muestras representativas detalladas en la Tabla 4.29 de esta investigación.

El análisis de estas imágenes evidencia diferentes resultados en cada membrana que se muestra en la Tabla 5.1 de forma resumida la morfología, el tipo de entrelazamiento de las nanofibras y los defectos hallados o ausencia de estos en cada una de las membranas.

**Tabla 5.1** Descripción de morfología y entrelazamiento de nanofibras

	Etiqueta	Voltaje [kV]	Caudal [mL/h]	Morfología y tipo de entrelazamiento de nanofibras	Defectos de la membrana
Membrana 01	P4-13%	7,5	5	Entrelazamiento de nanofibras en todas las direcciones con aparente forma de malla	Nanofibras con inclusiones granulares
Membrana 02	P6-13%	10	4	Entrelazamiento de nanofibras en todas las direcciones con aparente forma de malla	Nanofibras con inclusiones granulares
Membrana 03	P8-13%	12,5	5	Entrelazamiento de nanofibras en todas las direcciones con aparente forma de malla	Nanofibras con inclusiones granulares
Membrana 04	P3-18%	12,5	3	Entrelazamiento de las nanofibras en forma de mallas	Sin defectos visibles
Membrana 05	P6-18%	10	4	Entrelazamiento de nanofibras en todas las direcciones y ligeramente trenzadas	Sin defectos visibles
Membrana 06	P9-18%	7,5	5	Entrelazamiento de nanofibras con trenzado helicoidal en forma de mallas	Escasa inclusión granular en nanofibras

Se observa defectos de inclusión granular en el 50% de las muestras evaluadas, donde las 3 membranas que se obtuvieron del proceso de electrohilado usando una solución polimérica al 13%(p/v) presentan este defecto. Las otras 3 membranas obtenidas con una solución polimérica al 18%(p/v), no presentan inclusión granular o presentan escasamente este defecto.

Según la teoría sobre el proceso de electrohilado y la obtención de membranas hechas de nanofibras, se sabe que la inclusión granular es un defecto que se presenta generalmente por contaminación de la solución, cambios bruscos de temperatura, excesiva humedad, presencia de sólidos en la solución (incompleta disolución del soluto) o parámetros operativos desfavorables. Sin embargo, dado que la mayoría de las condiciones

anteriores han sido estrictamente controladas se puede inferir que la contaminación de la solución puede ser la razón más viable que causa la inclusión granular en las nanofibras, debido a que en la preparación de la solución polimérica de concentración al 13% (p/v) para los ensayos finales, se usó el cloroformo residual que se adquirió para esta investigación y este podría tener contaminantes sedimentados en el fondo del recipiente.

La morfología y entrelazamiento de las nanofibras, se observa que es buena en todas las muestras evaluadas, especialmente en las que presentan una morfología enmallada y un entrelazamiento de nanofibras con trenzado helicoidal, esta última característica es muy importante debido a que, teóricamente otorga una mayor resistencia mecánica de las membranas obtenidas por electrohilado.

## 5.2. Diámetro de nanofibras

La evaluación del diámetro de las nanofibras se lleva a cabo mediante el análisis de las imágenes de las 6 muestras representativas detalladas en la Tabla 4.29, las cuales son suministradas por el microscopio electrónico de barrido (SEM). Estas imágenes revelan resultados diversos en cada una de las membranas.

A continuación, en la Tabla 5.2 se muestra de forma resumida los valores máximos y mínimos del diámetro de las nanofibras que conforman la estructura interna de las membranas evaluadas.

**Tabla 5.2** Diámetros de las nanofibras

	Concentración de la solución	Etiqueta	Voltaje [kV]	Caudal [mL/h]	Diámetro mínimo [nm]	Diámetro máximo [nm]
Membrana 01	13%	P4-13%	7,5	5	1590	4340
Membrana 02	13%	P6-13%	10	4	985,9	3747
Membrana 03	13%	P8-13%	12,5	5	1590	4303
Membrana 04	18%	P3-18%	12,5	3	3384	5616
Membrana 05	18%	P6-18%	10	4	5422	7038
Membrana 06	18%	P9-18%	7,5	5	5119	8153

Se observa que las membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración 13%(p/v), son las que muestran nanofibras de diámetros menores, con un valor mínimo de 985 nanómetros y un valor máximo de 4340 nanómetros.

Sin embargo, se observa que las membranas obtenidas a partir de una solución de concentración 18%(p/v) muestran nanofibras de mayor diámetro, con un valor mínimo de 3384 nanómetros y un valor máximo de 8153 nanómetros, valores que se incrementan un 243% respecto al diámetro mínimo y un 87% respecto al diámetro máximo de las nanofibras.

Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos y expuestos en la Tabla 5.2 de esta investigación, se confirma la teoría que señala que a medida que la viscosidad de la solución disminuye o la concentración de soluto en la solución es menor, se obtienen menores diámetros en el proceso de electrohilado.

### 5.3. Separación lineal entre nanofibras

La separación lineal de las nanofibras se infiere que podría estar vinculada a la determinación de la porosidad de las membranas, por lo tanto, la determinación de la separación lineal entre nanofibras se realiza en base al análisis de las imágenes de las 6 muestras representativas detalladas en la Tabla 4.29, las cuales son proporcionadas por el microscopio electrónico de barrido (SEM). A continuación, en la Tabla 5.3 se muestra de forma resumida los valores máximos y mínimos de la separación lineal entre nanofibras.

**Tabla 5.3** Separación lineal entre nanofibras

	Concentración de la solución	Etiqueta	Voltaje [kV]	Caudal [mL/h]	Mínima Separación [μm]	Máxima separación [μm]
Membrana 01	13%	P4-13%	7,5	5	14,72	45,94
Membrana 02	13%	P6-13%	10	4	5,925	17,97
Membrana 03	13%	P8-13%	12,5	5	6,189	37,43
Membrana 04	18%	P3-18%	12,5	3	13,58	54,23
Membrana 05	18%	P6-18%	10	4	10,39	35,27
Membrana 06	18%	P9-18%	7,5	5	20,00	37,09

Según los datos evaluados en la Tabla 5.3, se muestra que a un menor voltaje se genera una menor diferencia entre la separación lineal máxima y mínima entre nanofibras; y a medida que el voltaje se incrementa existe una mayor diferencia entre la separación lineal mínima y máxima. Por lo tanto, el voltaje podría estar vinculado en la homogeneidad del tamaño de poro de la membrana.

Estos resultados coinciden con la teoría que señala que el voltaje afecta directamente la porosidad de las membranas obtenidas por electrohilado.

#### **5.4. Influencia de la variación de parámetros en el proceso electrohilado**

Para evaluar la influencia de la variación de los parámetros operativos en la obtención de membranas a partir de nanofibras de PLA y como afectan directamente las características de su estructura interna se realiza el análisis de los resultados obtenidos de la caracterización previamente detallada en las Tablas 5.2 y 5.3, con datos relacionados al diámetro de las nanofibras y la separación lineal de estas.

Los parámetros de electrohilado a evaluar en esta etapa de la investigación son 3, la diferencia de potencial o voltaje, el caudal de inyección y la concentración de la solución polimérica.

##### **5.4.1. Influencia de la variación del voltaje**

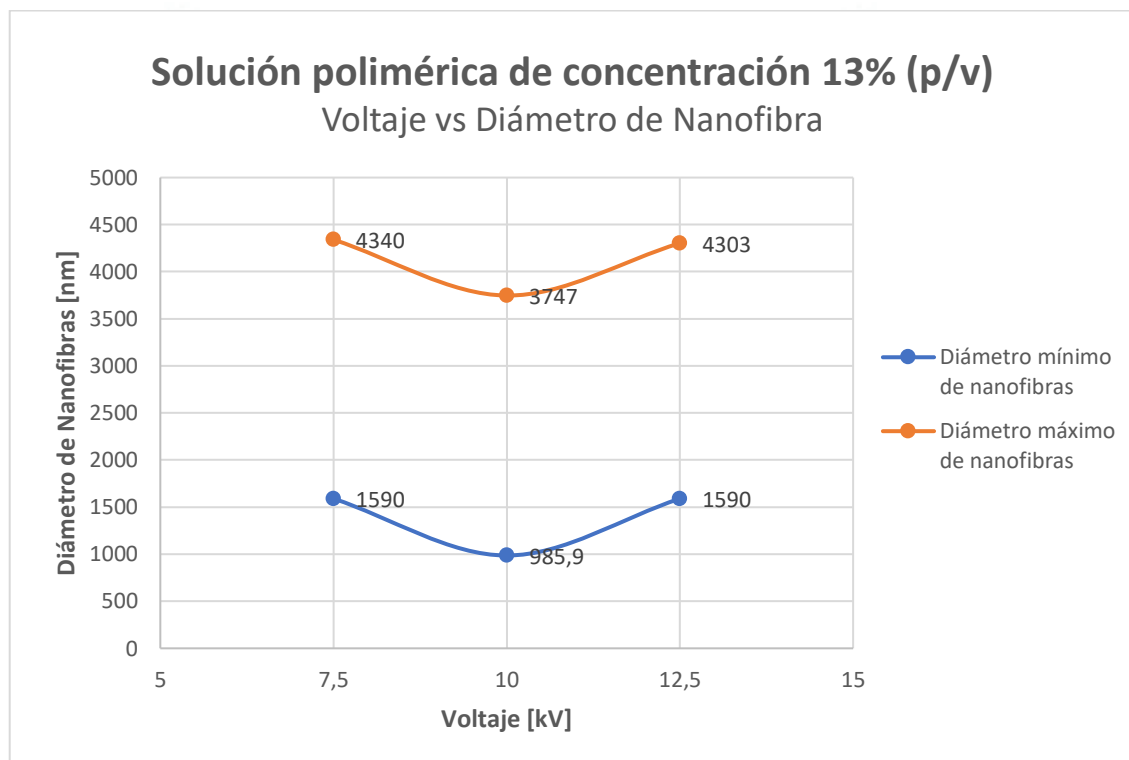
La variación del voltaje como parámetro operativo es un factor que influye de forma directa en la obtención de las nanofibras. A continuación, se realiza un análisis en base a los resultados obtenidos de las membranas caracterizadas en el microscopio electrónico de barrido (SEM).

##### **a) Influencia de la variación del voltaje en el diámetro de las nanofibras**

En la Figura 5.1 se muestra la tendencia del diámetro de las nanofibras en función de la variación del voltaje en una membrana obtenida a partir de una solución polimérica al 13%(p/v) de concentración. Se observa que los menores diámetros se obtienen a un voltaje de 10 kV, cuyos valores de diámetro mínimo y máximo de nanofibra en función a este

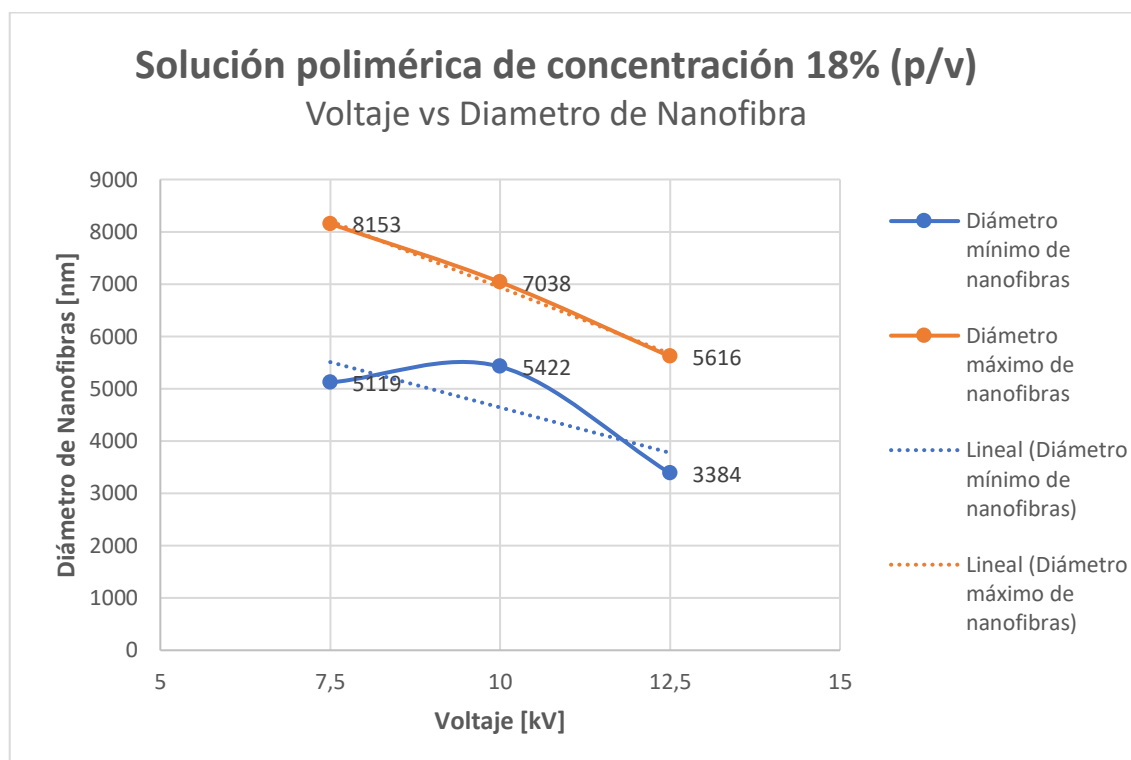
voltaje son de 985,9 nanómetros y 3747 nanómetros respectivamente. Por lo tanto, en base a los resultados de esta investigación, en un proceso de electrohilado que utiliza una solución polimérica a una concentración del 13%(p/v) se puede establecer un mejor control del diámetro de las nanofibras a un parámetro de 10kV.

**Figura 5.1** Diámetro de nanofibras en función del voltaje en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 13%(p/v)



En la Figura 5.2 se muestra la tendencia del diámetro de las nanofibras en función de la variación del voltaje en una membrana obtenida a partir de una solución polimérica al 18%(p/v) de concentración. Se observa una aparente tendencia lineal decreciente donde el diámetro de las nanofibras disminuye a medida que el voltaje aumenta, es decir tienen una relación inversamente proporcional. Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos en esta investigación se puede afirmar que a mayor voltaje se obtiene un menor diámetro de nanofibra y viceversa.

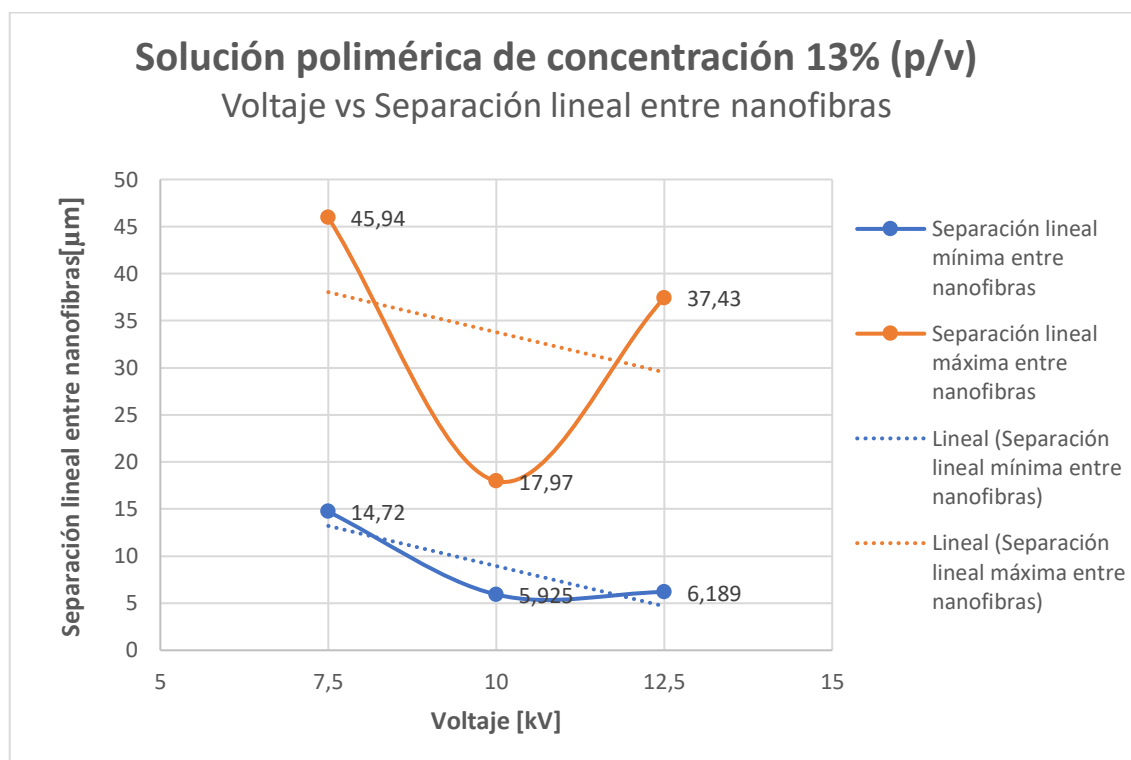
**Figura 5.2** Diámetro de nanofibras en función del voltaje en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 18%(p/v)



**b) Influencia de la variación del voltaje en la separación lineal entre nanofibras**

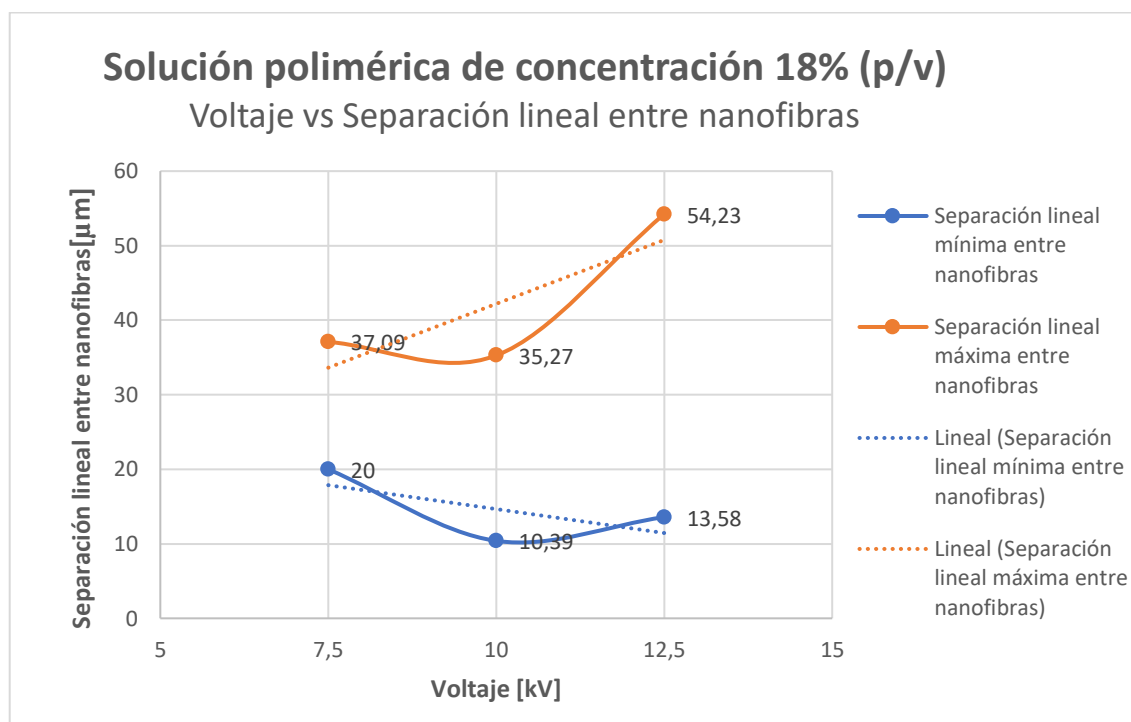
En la Figura 5.3 se muestra la tendencia de la separación lineal entre nanofibras en función de la variación del voltaje en una membrana obtenida a partir de una solución polimérica al 13%(p/v) de concentración. Se observa una tendencia decreciente con una relación inversamente proporcional, es decir que la separación lineal disminuye a medida que el voltaje aumenta. También se visualiza una mayor homogeneidad o una menor diferencia entre el valor máximo y mínimo de la separación lineal entre nanofibras a un voltaje de 10 kV, cuyos valores van desde una separación mínima de 5,925 micrómetros hasta una separación máxima de 17,97 micrómetros. Así mismo, existe una mayor diferencia entre los valores máximos y mínimos de la separación lineal en función a los voltajes de 7,5kV y 12,5 kV.

**Figura 5.3** Separación lineal entre nanofibras en función del voltaje en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 13%(p/v)



En la Figura 5.4 se muestra la tendencia de la separación lineal entre nanofibras en función de la variación del voltaje en una membrana obtenida a partir de una solución polimérica al 18%(p/v) de concentración. Se observa que la separación lineal máxima y mínima entre nanofibras tienen una relación inversa a medida que el voltaje aumenta, es decir, a medida que se incrementa el voltaje la separación lineal máxima se incrementa mientras que la separación lineal mínima disminuye, por lo tanto, se puede afirmar que, al incrementarse el voltaje la separación lineal entre nanofibras es menos homogénea y se presenta una tendencia al aumento de la diferencia entre su valor máximo y mínimo.

**Figura 5.4** Separación lineal entre nanofibras en función del voltaje en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 18%(p/v)



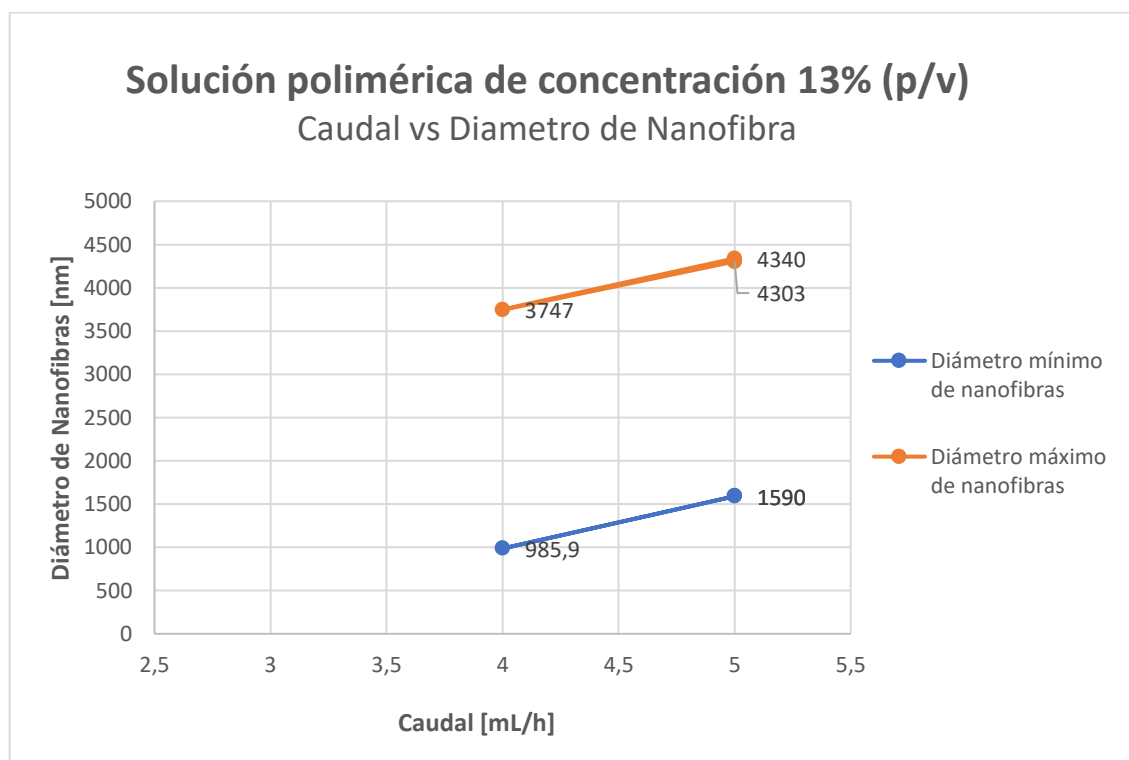
#### 5.4.2. Influencia de la variación del caudal de inyección

La variación del caudal de inyección como parámetro operativo es un factor que influye en la estructura interna de las membranas obtenidas del electrohilado. A continuación, se realiza un análisis en base a los resultados obtenidos de las membranas caracterizadas en el microscopio electrónico de barrido (SEM).

##### a) Influencia de la variación del caudal de inyección en el diámetro de las nanofibras

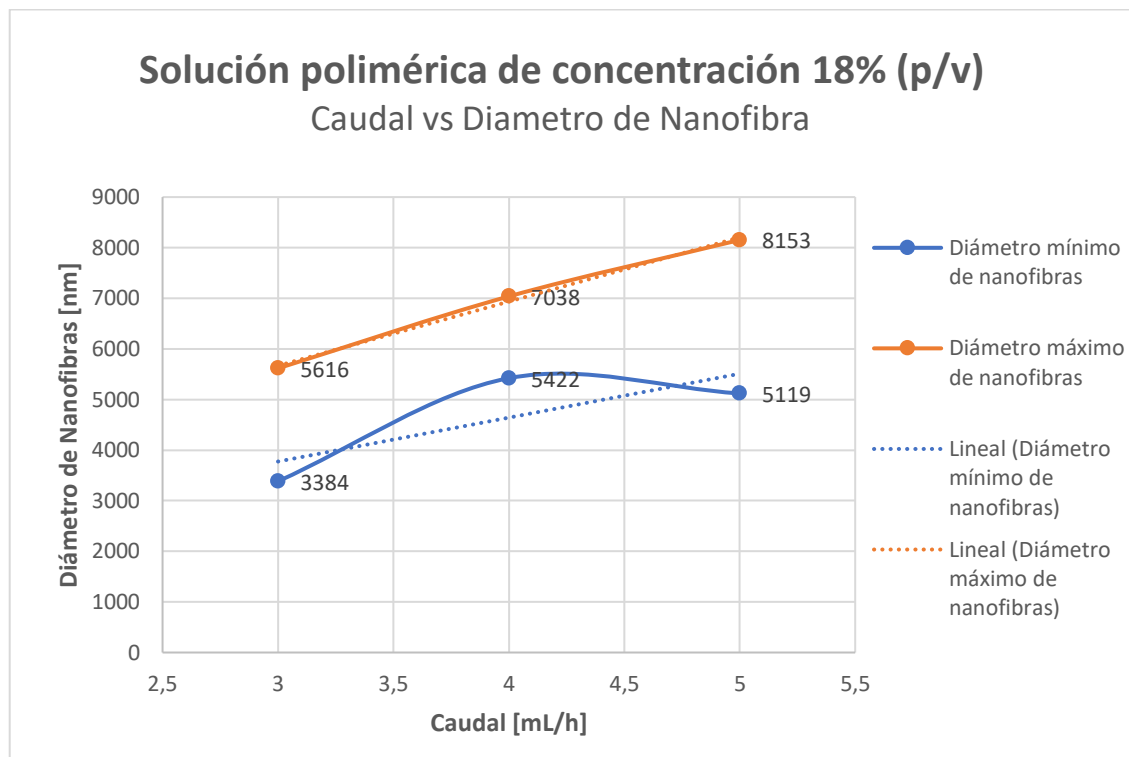
En la Figura 5.5 se muestra la tendencia de la variación del diámetro de las nanofibras en función de la variación del caudal de inyección en una membrana obtenida a partir de una solución polimérica al 13%(p/v) de concentración. Se observa una tendencia creciente con una relación directamente proporcional del diámetro de las nanofibras en función del caudal, es decir, a medida que el caudal de inyección aumenta, el diámetro de las nanofibras también se incrementa. Por lo tanto, en base al análisis de los resultados obtenidos en esta investigación se puede afirmar que, a mayor caudal de inyección se genera un diámetro mayor de las nanofibras.

**Figura 5.5** Diámetro de nanofibras en función del caudal de inyección en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 13%(p/v)



En la Figura 5.6 se muestra la tendencia de la variación del diámetro de las nanofibras en función de la variación del caudal de inyección en una membrana obtenida a partir de una solución polimérica al 18%(p/v) de concentración. Se observa una tendencia creciente con una razón directamente proporcional del diámetro de las nanofibras en función del caudal de inyección, es decir, a medida que el caudal de inyección se incrementa, el diámetro de las nanofibras aumenta. Por lo tanto, se puede afirmar en base a los resultados obtenidos en esta investigación que en un proceso de electrohilado a mayor caudal de inyección se genera diámetros mayores en las nanofibras.

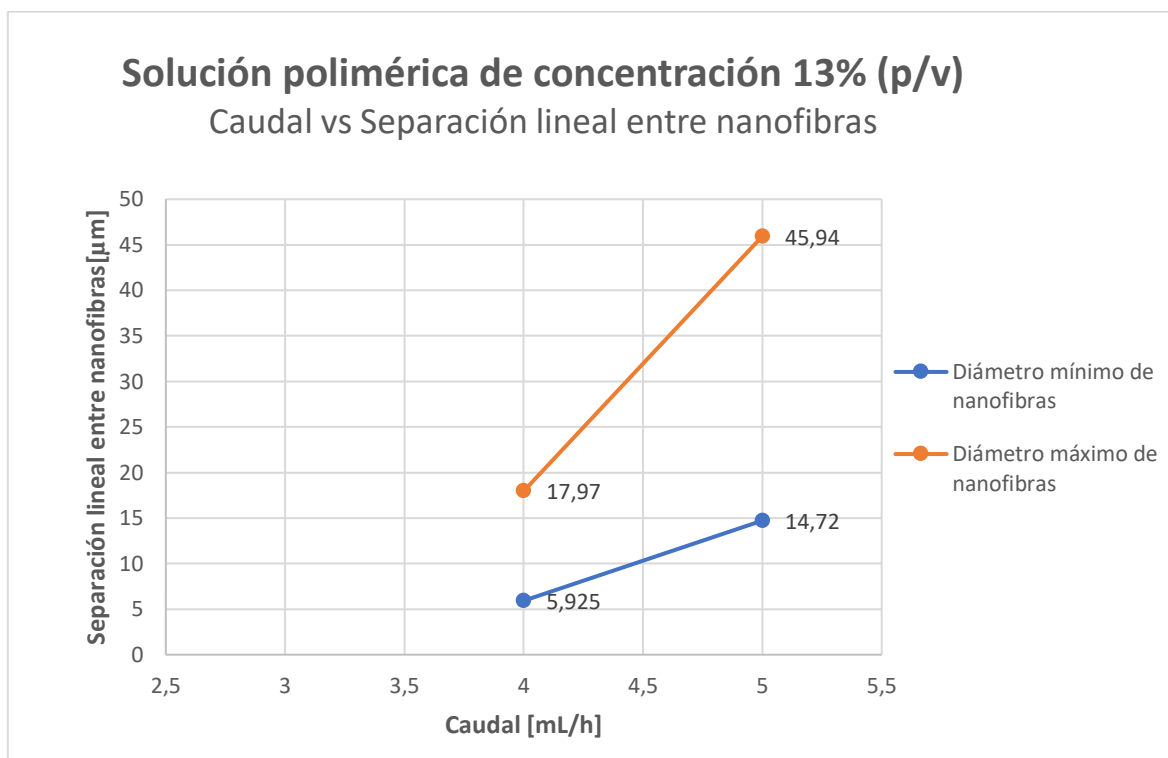
**Figura 5.6** Diámetro de nanofibras en función del caudal de inyección en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 18%(p/v)



**b) Influencia de la variación del caudal de inyección en la separación lineal entre nanofibras**

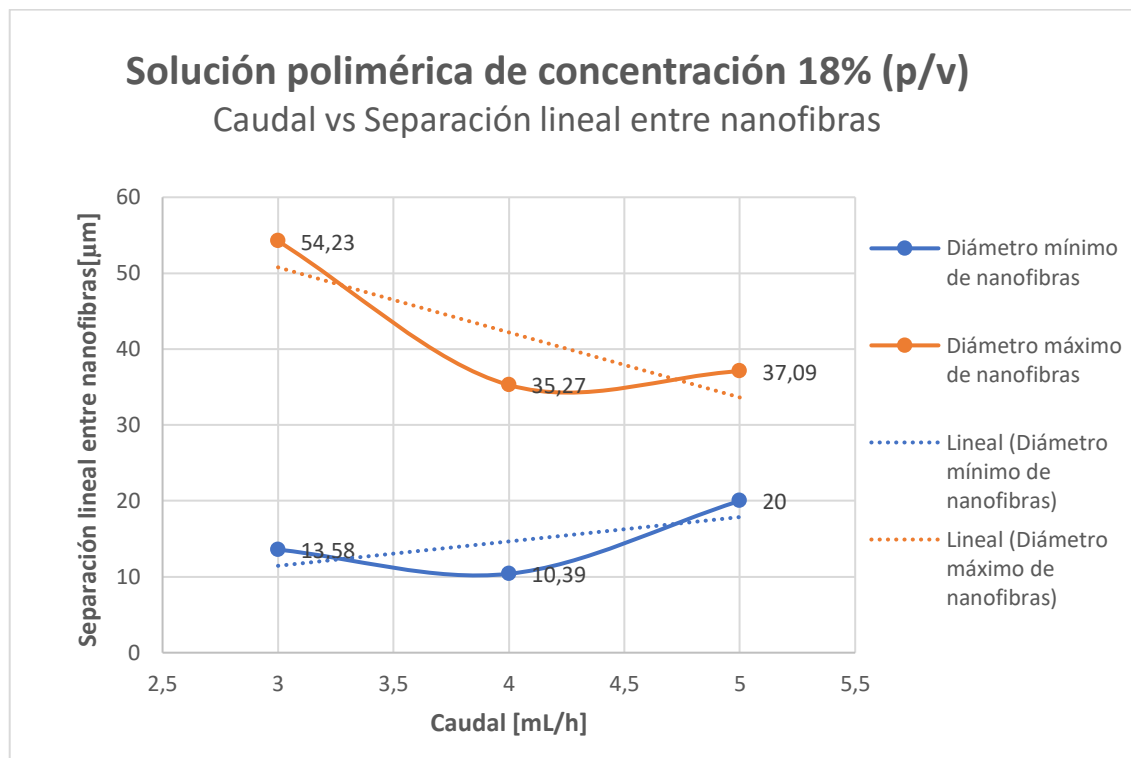
En la Figura 5.7 se muestra la tendencia de la variación de la separación lineal entre nanofibras en función de la variación del caudal de inyección en una membrana obtenida a partir de una solución polimérica al 13%(p/v) de concentración. Se observa una tendencia creciente con una razón directamente proporcional de la separación lineal entre nanofibras en función de la variación del caudal de inyección, es decir, a medida que el caudal aumenta la separación lineal entre nanofibras es mayor.

**Figura 5.7** Separación lineal entre nanofibras en función del caudal de inyección en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 13%(p/v)



En la Figura 5.8 se muestra la tendencia de la variación de la separación lineal entre nanofibras en función de la variación del caudal de inyección en una membrana obtenida a partir de una solución polimérica al 18%(p/v) de concentración. Se observa que la separación lineal máxima y mínima entre nanofibras tienen una relación inversa a medida que el caudal de inyección aumenta, es decir, cuando el caudal de inyección incrementa, la separación lineal máxima disminuye mientras que la separación lineal mínima aumenta, por lo tanto, con el análisis de los resultados de esta investigación se puede afirmar que, al incrementarse el caudal de inyección en el proceso de electrohilado, la diferencia entre el valor máximo y mínimo de la separación lineal entre nanofibras es menor.

**Figura 5.8** Separación lineal entre nanofibras en función del caudal de inyección en membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 18%(p/v)



#### 5.4.3. Influencia de la variación de concentración de la solución polimérica

En base a los resultados obtenidos de la caracterización de las membranas con el apoyo del microscopio electrónico de barrido, se observa que la influencia de la concentración en la solución polimérica utilizada en el proceso de electrohilado afecta directamente al diámetro de las nanofibras.

Las membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 13%(p/v), muestran resultados respecto al diámetro de las nanofibras que componen la estructura interna de la membrana, donde se identifica un diámetro mínimo de 985,9 nanómetros, un diámetro máximo de 4340 nanómetros y un diámetro promedio de 2759,3 nanómetros.

Las membranas obtenidas a partir de una solución polimérica de concentración al 18%(p/v), muestran mayores diámetros de nanofibras, donde se identifica un diámetro mínimo de 3384 nanómetros, un diámetro máximo de 8153 nanómetros y un diámetro promedio de 5788,6 nanómetros.

Por lo tanto, en base a los resultados anteriormente detallados se puede afirmar que, a una mayor concentración de soluto en la solución polimérica, se obtienen nanofibras de diámetros mayores.



## CONCLUSIONES

Finalmente, el desarrollo de esta investigación permitió obtener membranas compuestas de nanofibras de PLA mediante el proceso de electrohilado que posteriormente fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de barrido para evaluar las características de la estructura interna de las membranas respecto a la morfología, el entrelazamiento de las nanofibras, el diámetro de las nanofibras y la separación lineal entre éstas.

Se logró optimizar el proceso de electrohilado al establecer un rango de parámetros óptimos para la obtención de buenos resultados en cuanto a las membranas y el proceso de electrohilado, por lo tanto, en esta investigación se definió un óptimo rango de voltaje entre 7,5 kV y 12,5 kV; así mismo, un óptimo rango en el caudal de inyección entre 3 mL/h y 5 mL/h y finalmente una óptima concentración de la solución polimérica entre 13%(p/v) y 18%(p/v).

Se caracterizó exitosamente la morfología y el entrelazamiento de las nanofibras con el apoyo de las imágenes proporcionadas por el microscopio electrónico de barrido (SEM), donde se identificó el mejor resultado en las membranas obtenidas a partir de una solución polimérica a base de PLA de concentración al 18%(p/v), cuyas características muestran una morfología enmallada, un entrelazamiento de nanofibras con tendencia a un trenzado helicoidal y nanofibras sin defectos de inclusión granular.

Se caracterizó exitosamente el diámetro de las nanofibras a través del análisis de las imágenes proporcionadas por el microscopio electrónico de barrido (SEM), donde se identificó los diámetros más pequeños en las membranas obtenidas de una solución polimérica a base de PLA de concentración al 13%(p/v), cuyos valores de diámetro mínimo y máximo son de 985,9 nanómetros y 3747 nanómetros respectivamente.

En conclusión, en base a los resultados obtenidos en esta investigación, se establece que el diámetro de las nanofibras se ve afectado de la siguiente forma por los parámetros operativos; a mayor voltaje aplicado se obtienen menores diámetros de nanofibras; a mayor caudal de inyección en el proceso se obtiene nanofibras con diámetros mayores; y a mayor concentración de soluto en la solución polimérica se obtiene nanofibras de mayor diámetro.



## RECOMENDACIONES

Hacer un análisis más profundo sobre los diluyentes del PLA puede contribuir a mejorar el proceso de electrohilado y reducir en su totalidad la generación de residuos en el proceso debido a la acumulación de material en la aguja de inyección, en consecuencia, mejorar la eficiencia del proceso al evitar la intervención continua del proceso para realizar limpieza.

Es posible mejorar el proceso de disolución de PLA para evitar problemas de contaminación al controlar la calidad del PLA (solute) y el grado de pureza del cloroformo (solvente) que serán usados para la preparación de la solución polimérica, así mismo, realizar la preparación de la solución polimérica usando equipos específicos para el proceso.

Usar equipo de protección personal para las manos con el fin de evitar el contacto directo de la piel con la aguja de inyección o el colector, de esta forma se elimina el riesgo de electrocución mientras se ejecuta el proceso de electrohilado.

Almacenar y manipular con estricto cuidado las membranas obtenidas al finalizar el proceso de electrohilado para evitar problemas de contaminación de las muestras y generar posteriores complicaciones en la etapa de caracterización mediante microscopía electrónica de barrido.

Implementar equipos específicos como un agitador magnético, una balanza electrónica de alta precisión, pipetas graduadas, frascos autoclavables y un microscopio digital, todos éstos de uso exclusivo para la máquina de electrohilado.



- Kaplan, j., & Grinstaff, M. (2015). Fabricación superhidrófobas materiales poliméricos para aplicaciones biomédicas. *Journal of Visualized Experiments*, 102. doi:10.3791/53117
- Meluci, S. (2022). Micro/nanoestructuras biorreabsorbibles obtenidas por impresion tridimensional y electrohilado para ingeniería de tejidos. Mar del plata: Universidad Nacional de Mar Del Plata. Obtenido de <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/bitstream/handle/123456789/709/SMelucci-TFG-IM-2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Molfino, H., Alcalde-Yañez, A., Valverde-Morón, V., & Villanueva-Salvatierra, D. (2020). Electrospinning: Avances y aplicaciones en el campo de la biomedicina. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, 706-7013. doi:10.25176/rfmh.v20i4.3004.
- Persona-Báez, B., Martínez-Pérez, C., & Zúñiga-Aguilar, E. (2020). Fabricación de fibras poliméricas a base de PLA obtenidas mediante electrohilado. *CULCYT*, 17(1), 1-6. doi:10.20983/culcyt.2020.1.4.1
- Ribera Querido, A., Puiggali Bellalta, J., & Valle Mendoza, L. (2015). Procesado de nuevos poliésteres y poliesteramidas mediante electrospinning. Matrices de micro/nanofibras para el crecimiento celular. España: Creative Commons. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2117/77654>
- Roa Rodriguez, M. (2017). Diseño, desarrollo e implementación de un dispositivo de pruebas de electrohilado para aplicaciones de nanoinstrumentación. Bucaramanga: universidad autonoma de bucamanga. Obtenido de [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/1515/2017\\_Tesis\\_Monica\\_Fernanda\\_Roa.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/1515/2017_Tesis_Monica_Fernanda_Roa.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sánchez Fuertes, A. (2022). Electrospinning vs Electro spraying para la optimización de los parámetros de deposición en el diseño de recubrimientos nanoestructurados de uso biomédico. Pamplona: UPNA. Obtenido de [https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/43528/Ainhoa\\_S%C3%A1nchez\\_TFG\\_%20Ingenier%C3%ADa\\_Biom%C3%A9dica.pdf?isAllowed=y&sequence=1](https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/43528/Ainhoa_S%C3%A1nchez_TFG_%20Ingenier%C3%ADa_Biom%C3%A9dica.pdf?isAllowed=y&sequence=1)
- Sill, T. J., & Von Recum, H. A. (2008). Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering. *Biomaterials*, 29(13), 1989-2006. doi:10.1016/j.biomaterials.2008.01.011.
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Fundamentos de química analítica* (Novena ed.). México, D.F.: Cengage Learning.