

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE MECÁNICA

TEMA:

“Caracterización de las nanofibras del polímero PLA (ácido poliláctico) obtenidas por electrohilado vertical para la fabricación de membranas”

Trabajo de Titulación, Modalidad Trabajo Experimental previo a la obtención del título de ingeniero mecánico, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato

AUTOR: Guanina Sailema Diego Javier

TUTOR: Ing. Oscar Iván Analuiza Maiza, Mg.

AMBATO – ECUADOR

2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **"CARACTERIZACIÓN DE LAS NANOFIBRAS DEL POLÍMERO PLA (ÁCIDO POLILÁCTICO) OBTENIDAS POR ELECTROHILADO VERTICAL PARA LA FABRICACIÓN DE MEMBRANAS"**, elaborado por estudiante **Diego Javier Guanina Sailema**, portador de la cedula de ciudadanía número C.C.: 1804416186, estudiante de la Carrera de Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, enero 2026



Ing. Oscar Iván Analuiza Maiza, Mg.

C.C.: 1803828266

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego Javier Guanina Sailema, con C.C.: 1804416186, declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente Trabajo Experimental con el tema: **"CARACTERIZACIÓN DE LAS NANOFIBRAS DEL POLÍMERO PLA (ÁCIDO POLILÁCTICO) OBTENIDAS POR ELECTROHILADO VERTICAL PARA LA FABRICACIÓN DE MEMBRANAS"** así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas con el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, enero 2026



Diego Javier Guanina Sailema

C.C.: 1804416186

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, enero 2026



Diego Javier Guanina Sailema

C.C.: 1804416186

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por el estudiante Diego Javier Guanina Sailema, de la carrera de Mecánica bajo el tema: **"CARACTERIZACIÓN DE LAS NANOFIBRAS DEL POLÍMERO PLA (ÁCIDO POLILÁCTICO) OBTENIDAS POR ELECTROHILADO VERTICAL PARA LA FABRICACIÓN DE MEMBRANAS"**

Ambato, enero 2026

Para constancia, firman:

Ing. Jorge Patricio Guamanquispe Toasa, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR
C.C.: 1802039485

Ing. María Belén Paredes Robalino, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR
C.C.: 1803745395

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico en primer lugar a Dios, siendo el que me ha guiado en cada paso. De manera muy especial, se lo dedico a mi madre María Diocelina Guanina Sailema, quien con su sacrificio diario ha marcado el rumbo de mi vida. Su apoyo, sus palabras de aliento y su confianza han sido la fuente de mi motivación, cada avance hacia mi formación profesional lleva presente la huella de su paciencia y ejemplo de perseverancia.

DIEGO JAVIER GUANINA SAILEMA

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi madre, por su apoyo incondicional, por su confianza y por ser el pilar fundamental de mi vida y mi formación académica.

Extiendo mi más sincero agradecimiento a mi Tutor Ing. Oscar Iván Analuiza, por paciencia, el acompañamiento académico y la orientación técnica durante la realización del presente trabajo, puesto que, fueron un aporte importante para el desarrollo adecuado de esta investigación.

A la Universidad Técnica de Ambato y a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, expreso gratitud por brindarme un espacio un espacio formativo que fortaleció mis habilidades y conocimientos.

DIEGO JAVIER GUANINA SAILEMA

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

PORTADA i
APROBACIÓN DEL TUTOR ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN iii
DERECHOS DE AUTOR iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO v
DEDICATORIA vi
AGRADECIMIENTO vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO viii
ÍNDICE DE FIGURAS ii
ÍNDICE DE TABLAS ii
RESUMEN EJECUTIVO iii
ABSTRACT iv
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO 1
1.1. Antecedentes investigativos 1
1.1.1. Antecedentes 1
1.1.2. Justificación 5
1.1.3. Fundamento Teórico 6
1.1.3.1. Electrohilado 6
1.1.3.2. Historia y Principio 7
1.1.3.3. Tipos de electrohilado 8
1.1.3.4. Evolución del electrohilado 10
1.1.3.5. Parámetros que influyen al electrohilado 11
1.1.3.6. Nanofibras Electrohiladas 12
1.1.3.7. Polímero 13

1.1.3.8. Ácido poliláctico (PLA) 13
1.1.3.9. Solvente 14
1.1.3.10. Cloroformo 15
1.2. Objetivos 16
1.2.1. Objetivo General 16
1.2.2. Objetivos específicos 16
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA 17
2.1. Equipos y materiales 17
2.1.1. Equipos 17
2.1.2. Materiales 18
2.1.3. Herramientas 20
2.2. Metodología 21
2.2.1. Hipótesis 22
2.3. Operacionalización de variables 22
2.3.1. Variables Independientes 22
2.4.1. Estimación de parámetros 24
2.4.2. Formulación de experimentación 25
2.4.3. Concentración de solución 25
2.4.4. Matriz de experimentación 26
2.5. Plan de recolección de datos 27
2.5.1. Obtención de reciclado de polímero PLA 27
2.5.2. Elaboración de muestras previas 28
2.5.3. Trituración 30
2.5.4. Disolución polimérica 30
2.5.5. Ensayo de viscosidad 31
2.5.6. Ensayo de Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier ... 34
2.5.7. Obtención de membranas mediante electrohilado vertical 35

2.5.8. Caracterización física 37
2.5.9. Micrografía 37
2.5.10. Análisis estadístico 39
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSION 41
3.1. Interpretación y tabulación de los resultados 41
3.2. Resultados de Ensayo de viscosidad 41
3.2.1. Recolección de datos obtenidos mediante en ensayo de viscosidad 41
3.2.2. Análisis de ensayo de viscosidad 41
3.3. Resultados de ensayo FTIR 43
3.3.1. Comparativa de espectro FTIR (Solvente/ Polímero /Solución) 43
3.3.2. Comparativa de espectro FTIR de Soluciones poliméricas 46
3.3.3. Análisis comparativo de resultados con datos bibliográficos. 47
3.4. Resultados de ensayo de electrohilado vertical 50
3.4.1. Análisis del proceso de electrohilado 50
A. Análisis de los diámetros registrados 51
B. Análisis de los Espesores registrados 53
3.5. Resultados del ensayo de microscopia SEM 56
3.5.1. Recolección de datos. 56
3.5.2. Análisis de ensayo de microscopia SEM 57
3.6. Discusión de resultados 59
3.7. Verificación de hipótesis 61
3.7.1. Hipótesis Nula (Ho) 61
3.7.2. Hipótesis alternativa (Ha) 61
3.7.3. Comprobación mediante ANOVA 61
3.7.4. Método Taguchi 65
3.8. Recursos 70
CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 71

4.1. Conclusiones 71
4.2. Recomendaciones 72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73
ANEXOS 79

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Electrohilado, Diagrama equipo y proceso 7
Fig. 2. Electrohilado coaxial 9
Fig. 3. Técnica avanzada de electrohilado 10
Fig. 4. Nanofibras electrohiladas 12
Fig. 5. Métodos de preparación de NP poliméricas 15
Fig. 6. PLA - Viscosidad 42
Fig. 7. Espectro (Solvente/ Polímero /Solución M1) 43
Fig. 8. Espectro (Solvente/ Polímero /Solución M2) 44
Fig. 9. Espectro (Solvente/ Polímero /Solución M3) 45
Fig. 10. Espectro de las soluciones poliméricas 46
Fig. 11. Región de estiramiento del carbonilo del PLLA y sus derivados secundarios 48
Fig. 12. Espectros infrarrojos FTIR del poli(ácido láctico) PLA 49
Fig. 13. Espectro FTIR del cloroformo líquido 49
Fig. 14. Membranas M1 vs Diámetro efectivo 51
Fig. 15. Membranas M2 vs Diámetro efectivo 52
Fig. 16. Membranas M3 vs Diámetro efectivo 52
Fig. 17. Membranas M1 vs Espesor 53
Fig. 18. Membranas M2 vs Espesor 54
Fig. 19. Membranas M3 vs Espesor 54
Fig. 20. Diagrama de los diámetros promedios registrados 59
Fig. 21. Tabla de Valores Críticos F (0.05) – Estadística 64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Equipos a utilizar 17
Tabla II. Materiales a utilizar 19
Tabla III. Herramientas a utilizar 20
Tabla IV. Variables independientes del proceso 23
Tabla V. Variables dependientes del proceso 24
Tabla VI. Parámetros estimados para el proceso 25
Tabla VII. % de concentración de solución 26
Tabla VIII. Matriz experimental del proceso 26
Tabla IX. Obtención de polímeros 27
Tabla X. Muestra preliminar 29
Tabla XI. Procedimiento para la disolución 31
Tabla XII. Ensayo de viscosidad 32
Tabla XIII. Procedimiento del ensayo de espectrometría FTIR 34
Tabla XIV. Obtención de membranas mediante electrohilado vertical 35
Tabla XV. Ensayo de micrografía sem 37
Tabla XVI. Datos recolectados - viscosidades 42
Tabla XVII. Datos obtenidos del ensayo de electrohilado 50
Tabla XVIII. Criterio de aceptación y rechazo 55
Tabla XIX. Muestras seleccionadas para ensayo sem 56
Tabla XX. Registro de diámetros obtenidos 57
Tabla XXI. Mejores muestras poliméricas 60
Tabla XXII. Matriz de verificación 62
Tabla XXIII. Resultados método anova 65
Tabla XXIV. Matriz para verificación 66
Tabla XXV. Resultados señal / ruido 67
Tabla XXVI. Recursos del trabajo experimental 70

RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto aborda la caracterización de fibras obtenidas a partir de ácido poliláctico (PLA) mediante electrohilado vertical, con el objetivo de establecer las condiciones operativas que permitan producir membranas con propiedades morfológicas adecuadas para futuras aplicaciones. Este estudio destaca la importancia de controlar variables como la concentración del polímero, el voltaje y la distancia entre la aguja y el colector, debido a su influencia directa en la estabilidad del chorro electrostático y en la formación de fibras.

Como parte del proceso experimental se evaluó la viscosidad de las soluciones poliméricas, evidenciando que la cantidad de PLA es el factor principal que regula la densidad y fluidez de la mezcla. Posteriormente, se aplicó el proceso de electrohilado empleando combinaciones de voltaje (6, 10 y 14 kV), distancias de inyección (9.5, 13.5 y 15.5 cm) y concentraciones del polímero (5, 10 y 20 g por 100 mL de cloroformo). Estas pruebas permitieron analizar tres grupos de soluciones (M1, M2 y M3), donde se evaluó la formación de fibras, el diámetro promedio y el espesor de las membranas. Se apreció que las soluciones M1 no lograron generar fibras por su baja viscosidad, mientras que M2 produjo membranas delgadas y M3 generó fibras más uniformes con estructuralmente estables.

Los resultados evidencian que la calidad final de las membranas depende de una adecuada selección y ajuste de los parámetros operativos. Las combinaciones que alcanzan un equilibrio entre la concentración del PLA, el voltaje y la distancia de inyección favorecen la obtención de fibras continuas con morfología estable.

Palabras clave: electrohilado vertical, ácido poliláctico (PLA), nanofibras poliméricas, microscopia SEM, espectroscopia FTIR, parámetros operativos.

ABSTRACT

This project addresses the characterization of fibers obtained from polylactic acid (PLA) through vertical electrospinning, with the aim of establishing the operating conditions that allow the production of membranes with morphological properties suitable for future applications. This study highlights the importance of controlling variables such as polymer concentration, voltage, and the distance between the needle and the collector, due to their direct influence on the stability of the electrostatic jet and fiber formation.

As part of the experimental process, the viscosity of the polymer solutions was evaluated, showing that the amount of PLA is the main factor regulating the density and fluidity of the mixture. Subsequently, the electrospinning process was applied using combinations of voltage (6, 10, and 14 kV), injection distances (9.5, 13.5, and 15.5 cm), and polymer concentrations (5, 10, and 20 g per 100 mL of chloroform). These tests allowed for the analysis of three groups of solutions (M1, M2, and M3), where fiber formation, average diameter, and membrane thickness were evaluated. It was observed that the M1 solutions failed to generate fibers due to their low viscosity, while M2 produced thin membranes and M3 generated more uniform fibers with stable structures.

The results show that the final quality of the membranes depends on the proper selection and adjustment of operating parameters. Combinations that achieve a balance between PLA concentration, voltage, and injection distance favor the production of continuous fibers with stable morphology.

Keywords: vertical electrospinning, polylactic acid (PLA), polymeric nanofibers, SEM microscopy, FTIR spectroscopy, operating parameters.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes investigativos

1.1.1. Antecedentes

El funcionamiento adecuado del electrohilado depende de una disposición correcta de sus elementos y del ajuste preciso de cada componente del sistema. Para generar fibras estables, el equipo requiere una fuente de alto voltaje que alimenta dos electrodos: uno conectado a la aguja emisora de la solución polimérica y otro acoplado al colector metálico [1]. Esta configuración permite que el campo eléctrico distorsione la gota situada en la punta del capilar hasta formar el cono de Taylor, etapa indispensable para el inicio del chorro electroestático. En sistemas de orientación vertical pueden presentarse inestabilidades, como la expulsión accidental de gotas o la desviación del chorro, fenómenos que pueden afectar la uniformidad y continuidad de las fibras depositadas. Para minimizar estas variaciones y garantizar una alimentación constante del fluido, resulta conveniente incorporar una bomba de infusión, ya que proporciona un caudal estable que contribuye a mantener el régimen de hilado. El comportamiento del polímero dentro del proceso depende de su capacidad para superar la tensión superficial, lo cual está influenciado por la viscosidad y composición de la solución [1]. A partir de la revisión realizada, es posible definir un montaje adecuado del sistema, seleccionando parámetros que permiten que el proceso sea eficiente.

El proceso de electrohilado depende de un conjunto de variables que deben regularse con precisión, pues cada una influye directamente en la morfología y en la estructura final de las fibras. La calidad del material producido está condicionada por tres grupos de parámetros: los asociados a la solución (concentración, viscosidad y comportamiento dieléctrico), los factores ambientales (temperatura y humedad del entorno) y los parámetros propios del proceso, que incluyen el voltaje aplicado, la distancia entre la aguja y el colector, y el tipo de disolvente utilizado [2]. Debido a que estos parámetros no se encuentran estandarizados para todos los polímeros, cada material requiere de una configuración específica que permita estabilizar el chorro electrostático y garantizar un hilado continuo. Esta ausencia de estandarización dificulta la obtención de fibras libres de defectos, ya que variaciones mínimas pueden

provocar cambios en el diámetro, discontinuidades o la formación de perlas. Aun así, cuando estos factores se ajustan de manera controlada, es posible modular la porosidad, la textura y la distribución de las fibras, lo que amplía significativamente el rango de aplicaciones en campos como la ingeniería de tejidos, la filtración, la encapsulación de fármacos y otros sectores industriales. Por ello, resulta esencial determinar los parámetros adecuados para cada material, de modo que se puedan generar fibras uniformes y con propiedades óptimas asegurando de esta manera un proceso eficiente.

El adecuado control de las variables que intervienen en el proceso de electrohilado constituye un requisito fundamental para asegurar la estabilidad del sistema y la obtención de fibras con características morfológicas confiables. Dentro de los factores más determinantes se encuentra el voltaje aplicado, cuya variación influye de manera directa en la formación y el diámetro de las fibras, ya que modifica la geometría del cono de Taylor y altera la estabilidad del chorro emitido desde la aguja. Investigaciones recientes han demostrado que pequeños cambios en este parámetro pueden generar modificaciones significativas en la estructura final de las nanofibras, evidenciando su papel crítico en el proceso [3]. Del mismo modo, la velocidad de alimentación de la solución polimérica incide en la porosidad y uniformidad de las fibras generadas. Cuando el caudal es insuficiente, el cono de Taylor pierde estabilidad y se producen irregularidades en la deposición del material, manifestándose defectos estructurales en la membrana resultante. Tomando en cuenta estos principios es posible establecer parámetros de operación óptimos que permitan un funcionamiento eficiente y controlado de la máquina de electrohilado.

El ácido poliláctico (PLA) ha adquirido un papel destacado en los últimos años debido a su creciente uso en sectores que demandan materiales con buen desempeño mecánico, estabilidad dimensional y compatibilidad ambiental. Diversos estudios han demostrado que su capacidad para formar estructuras amorfas o semicristalinas, determinada por su peso molecular y configuración estereoquímica, influye directamente en su rigidez, transparencia y respuesta térmica [4]. Estas características han permitido que el material se consolide en aplicaciones como empaques, dispositivos médicos y componentes de ingeniería ligera, donde la resistencia al transporte de gases y la estabilidad frente a condiciones de almacenamiento son

factores determinantes [5]. La versatilidad del PLA también ha impulsado su adopción en técnicas de procesamiento avanzado, entre ellas el electrohilado, que posibilita la obtención de membranas nanofibrosas con morfologías controladas y propiedades superficiales adecuadas para usos biomédicos, filtración o ingeniería de materiales [6]. Por sus cualidades, este polímero se presenta como un material apropiado para trabajos investigativos, al poder ser utilizado en el proceso de electrohilado, donde permite obtener membranas nanofibrosas con potencial para diferentes aplicaciones.

El cloroformo es un líquido volátil e incoloro ampliamente utilizado a nivel industrial, sobre todo como agente desengrasante y disolvente de compuestos orgánicos. En el campo de los polímeros, la interacción entre el solvente y la cadena polimérica resulta determinante, ya que condiciona la disolución, la procesabilidad y, en etapas posteriores, la morfología del material obtenido. En el caso particular del ácido poliláctico (PLA), diversos estudios señalan al cloroformo como un buen solvente, capaz de disolverlo con facilidad y favorecer la obtención de fibras por electrohilado gracias a su alta volatilidad y adecuada compatibilidad con la matriz polimérica [7]. Este comportamiento lo convierte en una opción apropiada para formular soluciones poliméricas homogéneas, lo que contribuye a un chorro más estable y a una formación de fibras más controlada durante el proceso de electrohilado de PLA [8].

El hilado electrostático se ha convertido en una técnica eficaz para producir membranas nanofibrosas con geometrías bien controladas y estructuras altamente uniformes, gracias a su capacidad para regular el diámetro de las fibras y la porosidad del material [9]. Cuando los parámetros operativos se ajustan correctamente, las membranas obtenidas muestran mayor estabilidad, continuidad y resistencia mecánica, lo que favorece su reutilización y reduce el impacto ambiental [3]. Este método destaca especialmente en aplicaciones de filtración, ya que la elevada superficie específica de las nanofibras permite capturar partículas finas sin comprometer la permeabilidad [9]. Por esta razón, la técnica de electrohilado representa una alternativa apta para la producción de membranas nanofibrosas de buena calidad y gran valor funcional.

Las investigaciones dedicadas al hilado de polímeros han demostrado que la policaprolactona (PCL) constituye un material altamente eficiente para la producción de fibras con buena resistencia mecánica, dado que combina baja densidad con una adecuada estabilidad estructural. En estudios realizados se evidenció que la orientación

del depósito influye directamente en el diámetro de las fibras obtenidas mediante electrohilado, donde las matrices alineadas presentaron diámetros entre 5 y 8 µm, mientras que las configuraciones aleatorias oscilaron entre 5 y 11 µm, y las fibras bicapa mostraron valores más uniformes entre 4 y 7 µm [10]. Esta tendencia coincide con trabajos que señalan que el PCL exhibe una óptima capacidad de deformación y una orientación molecular favorable, lo que contribuye a su desempeño mecánico en aplicaciones estructurales. A partir de estos resultados, la PCL se posiciona como un polímero adecuado para electrohilado, ya que permite generar membranas con uniformidad morfológica y resistencia adecuada para usos biomédicos y de ingeniería [11].

En el ámbito de la ingeniería textil, la incorporación del electrohilado ha permitido desarrollar membranas compuestas con propiedades mejoradas, lo que ha favorecido su adopción en la fabricación de estructuras funcionales para tejidos técnicos. Estudios recientes señalan que la poliamida (PA6) puede electrohilarse mediante sistemas sin aguja, generando fibras uniformes y libres de defectos, condición esencial para aplicaciones de soporte textil [12]. En estos procesos, el polipropileno actúa como sustrato estructural cuando se integra en tejidos no tejidos, tejidos planos o tejidos de punto, aportando estabilidad mecánica y compatibilidad con la nanocapa depositada. La combinación PA6–PP ha demostrado mejorar la resistencia al desgarro, la capacidad de carga y la durabilidad, lo que confirma su potencial para la conformación de membranas compuestas de alto rendimiento utilizadas en sectores industriales y biomédicos [12].

El control preciso de la estructura de las fibras durante su fabricación se ha convertido en un aspecto decisivo para aplicaciones biomédicas, especialmente en sistemas que requieren una liberación sostenida y predecible de fármacos. Investigaciones recientes con copolímeros como el ácido poli(láctico-co-glicólico) (PLGA) han demostrado que, mediante condiciones adecuadas de electrohilado, es posible generar fibras altamente alineadas y con una distribución de diámetros sumamente uniforme, lo que favorece un comportamiento controlado en la liberación del principio activo. En estos estudios se evidenció que las membranas obtenidas presentan una liberación inicial adecuada y mantienen una degradación progresiva durante más de tres semanas, comportamiento que refuerza su potencial como plataformas terapéuticas avanzadas

[13]. A partir de las investigaciones, se evidencia la importancia de realizar una búsqueda completa de información sobre diferentes polímeros, considerando que cada uno posee características y propiedades específicas que pueden ofrecer ventajas según la aplicación a la que se destine.

El análisis estructural de las membranas obtenidas por electrohilado requiere técnicas que permitan examinar su morfología y composición química con alta precisión. La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) es una herramienta esencial para evaluar el diámetro, la continuidad y la presencia de defectos en las fibras, mediante la observación directa en escalas micro y nanométricas. En investigaciones con PLA y PVA/CS, el SEM ha permitido identificar fibras libres de perlas y con diámetros controlados tras ajustes en los parámetros de hilado [14]. Además, la Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) posibilita verificar la integridad química de los polímeros, así como la presencia de grupos funcionales característicos, siendo útil para confirmar la ausencia de degradación o la interacción con aditivos o nanopartículas [15]. Por esta razón, la combinación de SEM y FTIR constituye un procedimiento indispensable para caracterizar la calidad morfológica y química de las membranas producidas mediante electrohilado.

1.1.2. Justificación

La acumulación persistente de polímeros sintéticos en ambientes terrestres y acuáticos ha generado una preocupación creciente debido a su lenta descomposición y al incremento sostenido en la producción global de plásticos como PET, PP, PVC o PE, cuyo manejo inadecuado intensifica los riesgos ecológicos y sanitarios. Estudios realizados demuestran que estos materiales, al fragmentarse en microplásticos, pueden incorporarse a cadenas tróficas y ocasionar efectos adversos en organismos y poblaciones humanas, lo que evidencia la urgencia de adoptar estrategias que mitiguen su impacto [16]. Ante esta situación, es importante investigar nuevas alternativas para uso de materiales poliméricos que reduzcan el impacto ambiental y de esta manera promover el reciclaje como opción viable para el tratamiento de polímeros.

La reutilización de materiales poliméricos en nuevos procesos se ha convertido en una necesidad urgente frente al impacto ambiental generado por la acumulación constante de residuos plásticos. Su elevada producción, combinada con una gestión ineficiente,

ha provocado afectaciones visibles tanto en los ecosistemas como en la salud humana debido a la persistencia de microplásticos y sustancias asociadas. Aunque el reciclaje mecánico es actualmente el método más extendido, sus limitaciones dificultan el empleo de materiales recuperados en aplicaciones de alta exigencia, especialmente cuando se requiere asegurar condiciones sanitarias y mecánicas estrictas. Esta situación evidencia la importancia de impulsar tecnologías más avanzadas y modelos de economía circular que permitan extender el ciclo de vida de los materiales, disminuir la presión sobre los recursos naturales y fomentar la innovación en procesos productivos sostenibles [17]. Por esta razón, es necesario realizar investigaciones enfocadas en el uso de polímeros reciclados para nuevas aplicaciones, de este modo aportando soluciones prácticas y sostenibles.

La investigación realizada se centra en el estudio de membranas poliméricas obtenidas por electrohilado, con el propósito de comprender cómo se conforman las fibras y qué tan eficiente resulta el proceso en términos estructurales y morfológicos. Esta técnica representa una opción factible dentro de la manufactura moderna, ya que permite transformar materiales que, por defectos de producción, serían descartados. Considerando que, los polímeros tradicionales se degradan lentamente y generan un impacto ambiental considerable, aprovechar estas materias mediante un nuevo procesamiento abre la posibilidad de extender su vida útil. Debido a esto, las membranas producidas pueden orientarse a aplicaciones como la filtración, la conservación de alimentos o el desarrollo de dispositivos funcionales, convirtiendo al electrohilado en una alternativa tecnológicamente valiosa.

1.1.3. Fundamento Teórico

1.1.3.1. Electrohilado

El electrohilado, también denominado hilado electrostático, es un método ampliamente utilizado para generar fibras extremadamente finas a partir de soluciones poliméricas. Su funcionamiento se fundamenta en la acción de un campo eléctrico capaz de estirar el fluido hasta formar filamentos continuos con dimensiones micro y nanométricas, fenómeno descrito en estudios sobre materiales como el PLA en aplicaciones de filtración [18]. La interacción entre el campo eléctrico, la viscosidad

de la solución y la dinámica del chorro determina la trayectoria y orientación de las fibras, lo que permite ajustar su morfología durante la fabricación. Este enfoque "de arriba hacia abajo", característico de los sistemas de electrohilado vertical, destaca por su eficiencia y simplicidad operativa, atributos que han impulsado su uso en el desarrollo de membranas funcionales con propiedades controladas [13]. Como se observa en la (Fig. 1).

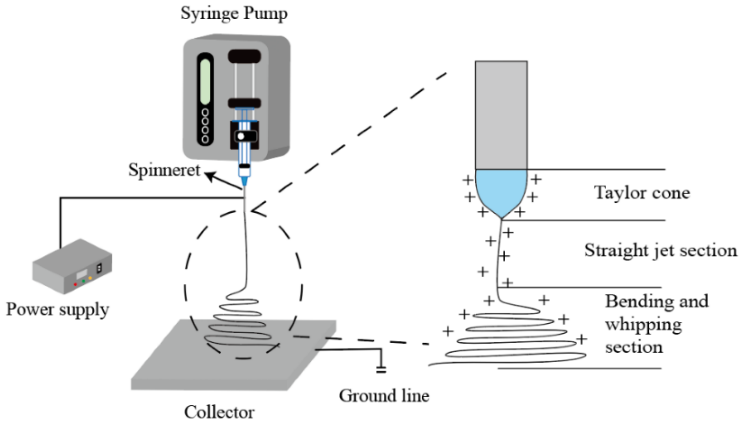


Fig. 1. Electrohilado, Diagrama equipo y proceso [19]

Para operar correctamente un sistema de electrohilado, se requiere un conjunto de elementos que garanticen la estabilidad del proceso, entre ellos una fuente de alto voltaje capaz de generar el campo electrostático necesario para la formación del chorro, un sistema de alimentación que regule con precisión el caudal de la solución y un colector donde se depositan las fibras generadas. Según [19], la interacción entre la fuente de voltaje y el mecanismo de inyección es determinante para obtener estructuras uniformes, puesto que cualquier variación en estos componentes altera directamente la morfología final de la membrana.

1.1.3.2. Historia y Principio

Los fundamentos del electrohilado se remontan a los primeros estudios de estabilidad electrohidrodinámica del siglo XX, donde se describió el comportamiento de chorros cargados sometidos a campos eléctricos intensos. Investigaciones posteriores permitieron comprender que, bajo estas condiciones, el fluido polimérico puede estirarse hasta formar filamentos de escala nanométrica, fenómeno explicado mediante la dinámica de modos inestables del chorro [20]. Décadas después, este principio dio

lugar a la técnica moderna de electrohilado, identificándose regiones características como el tramo rectilíneo inicial y la zona de inestabilidad tipo “látigo”, esenciales para la generación continua de nanofibras.

El estiramiento y la solidificación acelerada de la solución durante el electrohilado se desarrollan mediante tres fases que describen la dinámica completa del proceso: la formación del cono de Taylor, la proyección del chorro y la zona inestable donde ocurren las fluctuaciones aerodinámicas y electrostáticas [21] . En esta secuencia, el polímero previamente colocado en una jeringa avanza hacia la aguja por efecto de la gravedad o a través del empuje generado por una bomba de infusión, lo que mantiene un suministro continuo del fluido y posibilita la salida controlada del chorro que dará origen a la fibra.

Durante el proceso de electrohilado, la aplicación de un campo eléctrico de alto voltaje genera la acumulación progresiva de cargas en la superficie de la gota que se forma en la punta de la aguja. Bajo esta influencia, la gota deja de comportarse como una esfera y adopta una geometría cónica estable conocida como cono de Taylor, cuya morfología depende del equilibrio entre la tensión superficial y las fuerzas electrostáticas aplicadas [22]. En esta etapa, la superficie de la gota depende tanto de la gravedad como de su tensión superficial.

1.1.3.3. Tipos de electrohilado

Electrohilado coaxial

El electrohilado coaxial constituye una variante avanzada del método convencional y permite procesar de manera simultánea dos soluciones poliméricas cómo se observa en la (Fig. 2), configurando una estructura núcleo/corteza gracias al uso de una boquilla interna contenida dentro de otra de mayor diámetro, tal como describe [23]. Esta disposición facilita que la solución externa actúe como medio conductor mientras el polímero del núcleo se orienta y solidifica sin requerir elevadas propiedades dieléctricas. Debido a esta capacidad de encapsulación y control morfológico, la técnica ha adquirido relevancia en aplicaciones biomédicas que demandan liberación dirigida y estabilidad estructural de los fármacos.

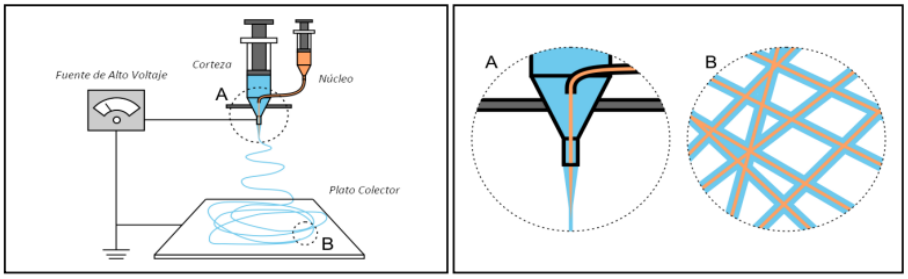


Fig. 2. Electrohilado coaxial [23]

Electrohilado coaxial con camisa de protección

En ciertas variantes del electrohilado coaxial se incorpora una corriente de aire regulada que actúa como una camisa de protección alrededor del chorro polimérico, recurso que estabiliza el proceso y disminuye las perturbaciones generadas durante la eyección del fluido. Este flujo auxiliar contribuye a uniformar el estiramiento del material y favorece la formación de fibras más homogéneas, reduciendo tanto irregularidades superficiales como variaciones de diámetro. El empleo de envolventes aerodinámicas ha demostrado mejorar la calidad morfológica de las nanofibras producidas en configuraciones avanzadas de electrohilado [24].

Electrohilado con doble componente

La electrohilado bicomponente generar fibras compuestas por dos materiales distintos en una sola hebra, consiguiendo nanofibras con propiedades mejoradas respecto a los métodos convencionales. En un estudio realizado fabricaron fibras donde ambos componentes quedan expuestos en la superficie, lo que favorece su funcionalidad como material heteroestructurado [25]. Por ello, se revela el potencial de producir membranas compuestas con propiedades avanzadas gracias a la combinación controlada de dos polímeros o materiales diferentes.

Electrohilado de fuerza (Forcespinning)

El método Forcespinning también conocido como hilado centrífugo, es una alternativa mecánica al electrohilado, en la que la formación de micro y nanofibras se logra mediante la fuerza centrífuga generada por un rotor que expulsa la solución o el fundido polimérico a través de orificios de pequeño diámetro. Cuando la fuerza

centrífuga supera la tensión superficial se originan chorros estables que se estiran y solidifican en el entorno, sin necesidad de aplicar campos eléctricos intensos [26]. Este enfoque permite procesar soluciones altamente viscosas e incluso polímeros fundidos, reduce o elimina el uso de disolventes y alcanza tasas de producción superiores a las del electrohilado convencional, lo que lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones a gran escala y con menor impacto ambiental [27].

1.1.3.4. Evolución del electrohilado

El electrohilado, también denominado hilado electrostático, se integra dentro de los métodos de atomización electrohidrodinámica, en los cuales un campo eléctrico intenso extrae un chorro de solución polimérica y favorece la evaporación casi instantánea del disolvente, originando fibras o partículas sólidas a escala micro y nanométrica [28]. En una primera etapa se utilizaron configuraciones de un solo fluido, pero el desarrollo de boquillas concéntricas y de múltiples canales ha permitido variantes más complejas, como el electrohilado coaxial, lado a lado y triaxial, capaces de procesar simultáneamente distintas soluciones con funciones específicas. Tal como se ve en la (Fig. 3), estos arreglos posibilitan la obtención de nanoestructuras avanzadas, entre ellas fibras núcleo/vaina y sistemas multicapa, ampliando de forma notable el abanico de propiedades y campos de aplicación de las membranas electrohiladas [28].

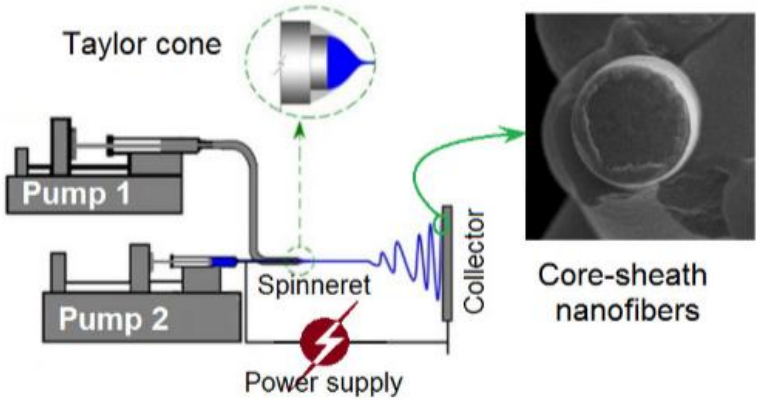


Fig. 3. Técnica avanzada de electrohilado [28]

1.1.3.5. Parámetros que influyen al electrohilado

Parámetros ambientales

El control de las condiciones ambientales constituye un desafío crítico en los procesos de síntesis, pues tanto la temperatura como la humedad modifican la cinética de reducción y la tasa de estabilización. La humedad elevada puede favorecer nucleaciones irregulares, comprometiendo la homogeneidad de las nanopartículas, mientras que un incremento térmico reduce la viscosidad y acelera la formación de núcleos más pequeños. Estas variaciones influyen directamente en la morfología final y en la distribución de tamaños, aspectos esenciales para la obtención de nanomateriales reproducibles [29].

Parámetros del disolvente

La elección del disolvente determina la calidad morfológica de las fibras, pues parámetros como la constante dieléctrica, la volatilidad y la tensión superficial controlan la estabilidad del chorro y la formación de defectos. Disolventes con mayor capacidad dieléctrica incrementan la densidad de carga en la solución, produciendo fibras más delgadas y con distribución uniforme, mientras que una volatilidad elevada favorece la aparición de poros útiles para aplicaciones específicas. Estudios evidencian que combinaciones binarias mejoran la uniformidad y reducen defectos gracias a su balance entre evaporación y conductividad [30].

Parámetros de la solución

Las propiedades intrínsecas de la solución como la concentración, la viscosidad y la constante dieléctrica condicionan la estabilidad del chorro y la morfología final de las fibras. Un aumento moderado de la concentración eleva la viscosidad, lo que favorece la continuidad del flujo y limita la ruptura del chorro, sin embargo, si la solución adquiere una viscosidad excesiva, el estiramiento electrostático disminuye y aparecen estructuras esféricas o fibras irregulares. Estos efectos han sido documentados al relacionar la viscosidad con la transición entre regímenes de estiramiento uniforme y la formación de defectos morfológicos [31].

Parámetros del proceso

Los parámetros operativos como el voltaje aplicado, el caudal de solución y la distancia aguja-colector determinan la estabilidad del chorro y la morfología resultante. El incremento del voltaje intensifica las fuerzas electrostáticas que estiran el fluido, produciendo fibras de menor diámetro [32]. De igual forma, flujos elevados tienden a generar fibras más gruesas y defectuosas por insuficiente estiramiento, mientras que flujos reducidos favorecen morfologías uniformes [29]. También, una separación inadecuada entre la aguja y el colector puede comprometer la solidificación del chorro y originar irregularidades en la estructura de las fibras [32].

1.1.3.6. Nanofibras Electrohiladas

Los nanomateriales unidimensionales han adquirido relevancia en la manufactura avanzada debido a su versatilidad funcional y a las propiedades fisicoquímicas derivadas de su escala reducida, especialmente su elevada relación superficie-volumen. Las nanofibras electrohiladas, cuyo diámetro puede abarcar desde cientos de nanómetros hasta unas pocas micras, presentan altos niveles de energía superficial y capacidad de interacción, lo que favorece su integración en sistemas biomédicos y de conversión energética. Estas estructuras pueden organizarse en redes porosas semejantes a mallas tridimensionales, utilizando polímeros naturales, sintéticos o materiales semiconductores como precursores [33]. En la (Fig. 4) se observa la morfología de ciertas fibras electrohiladas.

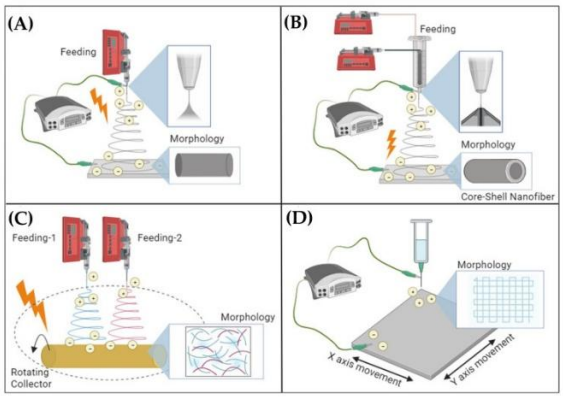


Fig. 4. Nanofibras electrohiladas [33]

1.1.3.7. Polímero

El desarrollo de los polímeros sintéticos marcó un punto de inflexión en la industria moderna, consolidándose a partir de la década de 1950 como materiales esenciales para procesos productivos globales. Aunque sus antecedentes se remontan a inicios del siglo XX con la introducción de la baquelita, su adopción masiva ocurrió tras la Segunda Guerra Mundial, cuando la demanda civil impulsó su diversificación. La síntesis de polímeros como polietileno y polipropileno depende de monómeros derivados de hidrocarburos fósiles, lo que evidencia la estrecha relación entre la petroquímica y la expansión de los materiales poliméricos [34].

1.1.3.8. Ácido poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico (PLA) es un biopolímero termoplástico obtenido mediante la policondensación del ácido láctico, el cual se produce a partir de recursos renovables como el maíz, la yuca, entre otros. Su estructura semicristalina le da mayor estabilidad y durabilidad respecto a otros polímeros biodegradables, favoreciendo su incorporación en envases y aplicaciones alimentarias dada su compatibilidad con normativas sanitarias [35].

A pesar de su origen sostenible, el PLA puro presenta limitaciones funcionales, como baja resistencia al impacto, escasa elongación a la rotura y propiedades antibacterianas limitadas en comparación con polímeros convencionales como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP). Su reducida estabilidad térmica y su rigidez restringen su aplicabilidad en procesos que requieren altos niveles de deformación o tolerancia térmica [5].

La vida útil del PLA está fuertemente condicionada por factores ambientales, ya que la humedad y la temperatura aceleran su degradación. En presencia de agua o fluidos provenientes de alimentos en descomposición, la matriz polimérica pierde unión estructural, reduciendo su resistencia mecánica y su estabilidad dimensional, afectando sus propiedades físicas y mecánicas [4].

En la última década, el PLA ha adquirido un rol importante en sectores como la medicina, el empaquetado sostenible, la manufactura de compuestos poliméricos y la

impresión 3D, debido a su biodegradabilidad y su comportamiento mecánico adecuado para piezas de precisión. Sin embargo, su expansión industrial continúa limitada por sus propiedades térmicas y mecánicas intrínsecas, que requieren modificaciones estructurales o técnicas de procesamiento avanzadas para ampliar su campo de aplicación [5].

1.1.3.9. Solvente

El empleo de disolventes orgánicos volátiles y clorofluorocarbonos ha sido tradicionalmente común en el procesamiento de polímeros, sin embargo, su uso representa un riesgo ambiental significativo por su contribución a la contaminación atmosférica y a la degradación de la capa de ozono. Investigaciones recientes han impulsado alternativas sostenibles basadas en fluidos súper críticos, particularmente dióxido de carbono en estado supercrítico, el cual presenta alta difusividad, baja tensión superficial y condiciones de operación favorables para la modificación y procesado de polímeros, posicionándose como una herramienta viable para aplicaciones industriales y comerciales [36].

Los fluidos que operan por encima de su temperatura y presión críticas adquieren propiedades híbridas entre gases y líquidos, lo que elimina la interfaz entre fases y favorece una alta capacidad de solubilidad. Esta condición supercrítica reduce los requerimientos energéticos y minimiza el impacto ambiental, razón por la cual estos medios se consideran alternativas sostenibles para el procesamiento de polímeros. Entre los solventes emergentes destacan el dióxido de carbono supercrítico y el agua supercrítica, ambos caracterizados por su inocuidad, estabilidad química y viabilidad económica en aplicaciones industriales [37].

En la (Fig. 5), se representa el método de evaporación de disolventes, reconocido como la primera técnica sistematizada para obtener nanopartículas poliméricas, en la cual la formación de una emulsión aceite-agua facilita la generación de nanoesferas mediante la posterior eliminación del disolvente orgánico. De manera complementaria, el método de emulsificación-difusión emplea un disolvente parcialmente miscible en agua que contiene el polímero y una fase acuosa estabilizada, permitiendo controlar la nucleación y el crecimiento de las nanopartículas mediante el ajuste de la difusión del disolvente hacia el medio externo [38].

La técnica de emulsificación/salificación inversa se basa en la separación de un disolvente hidromiscible desde una fase acuosa mediante la adición de sales, creando condiciones que favorecen la formación de nanoesferas poliméricas de manera controlada. Por su parte, el método de nanoprecipitación depende del desplazamiento del disolvente, donde el polímero se disuelve en un medio orgánico completamente miscible en agua, como acetona o acetonitrilo y al introducirse en la fase acuosa, la rápida difusión del disolvente y su posterior evaporación promueven la nucleación y el crecimiento uniforme de nanopartículas [38].

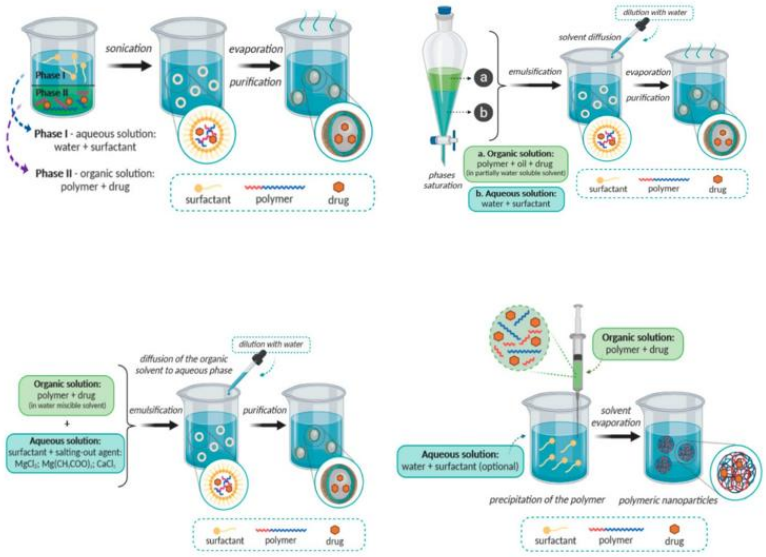


Fig. 5. Métodos de preparación de NP poliméricas [38]

1.1.3.10. Cloroformo

El cloroformo $CHCl_3$, también denominado triclorometano, es un compuesto orgánico volátil presente en el ambiente y en fuentes de agua potable como subproducto de los procesos de desinfección por cloración. Aunque no se clasifica como genotóxico, su exposición prolongada representa un riesgo por su potencial carcinogeno y por los daños hepáticos. En el hígado, el cloroformo puede oxidarse a fosgeno, una molécula altamente reactiva capaz de comprometer la integridad mitocondrial, disminuir el potencial de membrana y desencadenar procesos de citotoxicidad aguda cuando las concentraciones superan los niveles fisiológicos de tolerancia [39].

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Caracterizar las nanofibras del polímero PLA (ácido poliláctico) obtenidas por electrohilado vertical para la fabricación de membranas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar pruebas preliminares para definir los parámetros óptimos: Voltaje y distancia entre aguja-colector, para el uso de la máquina de electrohilado del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.
- Realizar el proceso de electrohilado vertical para obtener membranas poliméricas.
- Analizar las membranas obtenidas mediante el uso del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) Y Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) para determinar la estructura y morfología.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1. Equipos y materiales

2.1.1. Equipos

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación se empleó el equipo de electrohilado vertical, que se encuentra en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato. En la Tabla I, se describen los equipos utilizados para el proceso experimental.

TABLA I
EQUIPOS A UTILIZAR

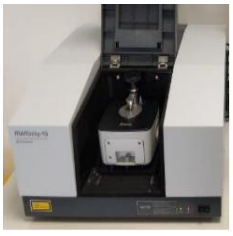
Dispositivo	Características técnicas	Material grafico
Máquina de electrohilado	- Voltaje de salida 0 – 14 kV - Distancia de inyección entre aguja – colector 9.5 – 15.5 cm - conexión a 220V - colector de 15x20 cm [40].	
Microscopio	- Marca Nikon YS100 - Aumento total desde 40x a 1500x - Diámetro de visión de 18mm - Lentes de aumento 4x, 10x, 40x y 100x [40].	
Espectrómetro FTIR	Características técnicas: - Detectores de alta sensibilidad DTGS - Transmisión, reflexión y ATR - Sellado herméticamente [40].	

TABLA I

EQUIPOS A UTILIZAR (continuación)

Agitador magnético	- Capacidad de 10 – 20 L - Temperatura de 500 °C - rango de velocidad 0 – 1500 rpm resolución ± 1rpm.	
Viscosímetro	- Marca: Nahita - v: 30 – 60 rpm - número de husillo: 1 - 4	
Balanza de precisión	- Marca sartorius - Peso MAX 1500 g - división de escala 0.01 g	

2.1.2. Materiales

Los materiales empleados para el desarrollo del presente Trabajo Experimental se detallan en la Tabla II, los cuales fueron elegidos con el propósito de garantizar un desempeño adecuado.

TABLA II

MATERIALES A UTILIZAR

Materiales	Características técnicas	Anexo
Ácido poliláctico (PLA)	- Estado sólido de productos reciclados - Temperatura de transición vítrea (Tg): 55 – 65 °C - Temperatura de fusión (Tm): 150 -180 °C - Cristalinidad: pueden variar entre 10% y 40% - Densidad: 1.24 g/cm^3 [41].	
Cloroformo	- Formula química: CHCl3 - Masa molar: 119.38 g/mol - Punto de ebullición: 61.2 °C - Estado liquido - Densidad: 1.49 g/cm^3 a 20°C - Liquido incoloro, volátil [42].	
Jeringas desechables	- Escala graduada 0 – 10 ml - Punta metálica - Diámetro exterior de aguja:	
Papel aluminio	- Conductor eléctrico - Contenido 7.6m	

TABLA II

MATERIALES A UTILIZAR (continuación)

Recipientes de vidrio	- Color ámbar - Volumen entre 100 ml y 500 ml	
Papel de cocina	- Absorbente - Desechable	

2.1.3. Herramientas

Las herramientas utilizadas durante el desarrollo del presente trabajo se detallan en la Tabla III.

TABLA III

HERRAMIENTAS A UTILIZAR

Herramientas	Características técnicas	Anexo
Kit de laboratorio	- Vasos de precipitación: volumen entre 50 ml y 300 ml - Tubos de ensayo de 15 ml - Agitador	
Equipo de protección personal de laboratorio	- Bata de laboratorio - Gafas - Mascara antigases - Guantes de nitrilo	
Flexómetro	- Capacidad de medición - Longitud: 3m	

2.2. Metodología

El presente proyecto experimental se desarrolló en la Universidad Técnica de Ambato, específicamente en el laboratorio de la carrera de Mecánica. Para la ejecución de los ensayos se empleó PLA triturado como material base y cloroformo como disolvente, que fueron utilizados en la preparación de la solución polimérica. El proceso de inyección se realizó mediante jeringas desechables, mientras que la máquina de electrohilado fue el equipo principal para la ejecución del proyecto. Estos materiales y equipos permitieron llevar a cabo los ensayos físicos y mecánicos asociados al proceso de obtención de membranas nanofibrosas.

Este trabajo se apoya en tres tipos de investigación: bibliográfica, experimental y correlacional, orientando la metodología empleada hacia la resolución del tema planteado. Mediante la investigación bibliográfica se recopilan datos, características y parámetros abordando un mejor enfoque sobre el fenómeno de estudio**.**

La investigación experimental abarca tanto la realización de ensayos, pruebas y observaciones a partir de variables independientes, tales como el voltaje, distancia entre aguja-colector, concentración de solución polimérica y viscosidad, estos parámetros son controlados durante el proceso de electrohilado, que mediante su variación se obtendrá distintos resultados que serán objeto de análisis.

Por su parte, la investigación correlacional se basa en la interpretación de los resultados obtenidos durante el proceso experimental, estableciendo una relación entre las variables que intervienen en el proceso y las propiedades finales de las fibras producidas. Permitiendo cuantificar como influyen los parámetros en las características morfológicas y estructurales de las fibras, con la finalidad de elaborar membranas con propiedades eficientes para diversas aplicaciones por medio de la optimización del proceso.

En cuanto a los materiales, se utilizará residuos de elementos fabricados a base de ácido poliláctico (PLA), el cual se encuentra en estado sólido y triturado lo que facilita su disolución, como complemento se utilizara cloroformo debido a que es un solvente óptimo para este polímero. Se prepararán distintas soluciones con la variación en la relación peso/volumen del polímero y el solvente, con el propósito de analizar el comportamiento de la disolución polimérica durante el proceso.

Los resultados obtenidos en las pruebas con la máquina de electrohilado contribuyen a la configuración del equipo, precisando valores óptimos de operación según el material utilizado. Para lo cual, se emplearán combinaciones de parámetros con el objetivo de observar su influencia durante el proceso. Se identificarán los parámetros adecuados para la elaboración de membranas de buena calidad mediante pruebas y experimentación, donde se considerará la microestructura, las propiedades físicas de las fibras obtenidas y la relación directa con la caracterización final.

2.2.1. Hipótesis

¿La fabricación de membranas por electrohilado permitirá obtener nanofibras de PLA?

La hipótesis planteada propone que el proceso de electrohilado posibilita la formación de nanofibras mediante el uso del polímero PLA. Debido a que, bajo parámetros controlados como el voltaje, concentración de polímero y distancia aguja-colector, el campo electroestático extiende la solución generando fibras continuas con medidas nanométricas.

2.3. Operacionalización de variables

2.3.1. Variables Independientes

En el electrohilado se analizan tres parámetros esenciales que influyen de manera directa en la formación de nanofibras: la concentración peso/volumen de la solución, el voltaje aplicado y la distancia entre la aguja y el colector.

Estos factores son las variables independientes del proceso debido a que, su variación permite determinar las condiciones óptimas para la obtención de fibras con morfología uniforme y propiedades adecuadas para su caracterización. En la Tabla IV, se detallan los valores asignados a cada una de las variables independientes contempladas durante el proceso de electrohilado.

En el electrohilado se analizan tres parámetros esenciales que influyen de manera directa en la formación de nanofibras: la concentración peso/volumen de la solución, el voltaje aplicado y la distancia entre la aguja y el colector.

Estos factores son las variables independientes del proceso debido a que, su variación permite determinar las condiciones óptimas para la obtención de fibras con morfología uniforme y propiedades adecuadas para su caracterización. En la Tabla IV, se detallan los valores asignados a cada una de las variables independientes contempladas durante el proceso de electrohilado.

TABLA IV

VARIABLES INDEPENDIENTES DEL PROCESO

Variables Independientes				
Proceso	**Variable**	**Medidor**	**Oscilaciones**	**Herramienta**
Pruebas realizadas en la máquina de electrohilado	voltaje aplicado	kV	0 -14	Máquina de electrohilado
	Distancia entre aguja – colector.	cm	0-25	Flexómetro, regla, calibrador
	Concentración de la solución	% p/v	0-100	Vaso de precipitación, tubos de ensayo, jeringas, agitador
	Viscosidad	mPa.s	Husillo con velocidad variable entre 6-30 rpm	Viscosímetro, Vaso de precipitación

2.3.2. Variables dependientes

En el presente trabajo experimental, las variables dependientes son los resultados obtenidos como consecuencia de los parámetros aplicados durante el proceso y de las propiedades de la solución polimérica. El diámetro promedio de las fibras, la

dimensión de la membrana, presencia de defectos superficiales, porosidad y uniformidad estructural son consideradas dichas variables.

Permitiendo evaluar la calidad y eficiencia del proceso de electrohilado, puesto que, muestran la influencia de los parámetros de operación sobre el resultado final del material producido. En la Tabla V, se detallan las variables dependientes analizadas durante el desarrollo del trabajo experimental.

TABLA V
VARIABLES DEPENDIENTES DEL PROCESO

Variables dependientes				
Proceso	**Variable**	**Medidor**	**Oscilaciones**	**Herramienta**
Obtención de membranas nanofibrosas	Diámetro de la fibra	nm	Diámetro promedio de la fibra	Microscopio
	Dimensión de la membrana	cm		Flexómetro, regla, calibrador
	Discontinuidades	Muestras realizadas	Perlas, gotas, uniformidad	Cámara, microscopio, inspección visual.
	Composición	cm-1	Diagramas en los que se encuentra cada composición	Espectrómetro FTIR

2.4. Diseño experimental, procedimientos y análisis

2.4.1. Estimación de parámetros

La determinación de los parámetros de operación es una etapa fundamental dentro del diseño experimental, ya que permite identificar las variables con las cuales se llevará a cabo el proceso y mediante cuyas variaciones se obtendrán diferentes resultados.

En la Tabla VI, se presentan los factores operativos involucrados durante el proceso de electrohilado, entre los cuales destacan el voltaje y la distancia entre la aguja-colector. Estos valores representan las variaciones establecidas para la obtención de las muestras.

Los factores mencionados son determinantes en la formación de las membranas, influyendo directamente en sus características morfológicas y en su caracterización física y estructural.

TABLA VI
PARÁMETROS ESTIMADOS PARA EL PROCESO

Parámetro	Unidades	Escala baja	Escala media	Escala alta
Voltaje	kV	6	10	14
Distancia aguja-colector	cm	9.5	13.5	15.5

2.4.2. Formulación de experimentación

Para la evaluación del comportamiento de las variables controladas y su influencia en los resultados experimentales, se ha considerado la aplicación de un diseño factorial. Este tipo de diseño se fundamenta en un enfoque estadístico-experimental que permite analizar los defectos individuales y combinados de múltiples factores dentro de un proceso.

En el presente estudio se implementó un diseño factorial 3^3, el cual contempla tres factores evaluados en tres niveles diferentes. Este enfoque permite comparar y determinar la interacción existente entre las variables que intervienen en el proceso de electrohilado, posibilitando así el análisis de la influencia de cada parámetro sobre las propiedades finales de las membranas obtenidas.

2.4.3. Concentración de solución

En el desarrollo del presente proyecto se prepararon tres soluciones poliméricas destinadas a la fase experimental. En la Tabla VII, se presentan diferentes concentraciones p/v (peso/volumen) elaboradas.

TABLA VII

% DE CONCENTRACIÓN DE SOLUCIÓN

Muestra	Detalle
M1	5g PLA – 100ml cloroformo
M2	10g PLA – 100ml cloroformo
M3	20g PLA – 100ml cloroformo

2.4.4. Matriz de experimentación

En la matriz experimental se contempla un total de 27 muestras, las cuales corresponden a las diferentes combinaciones de parámetros que se han considerado dentro del diseño factorial. Cada muestra corresponde a una configuración de las variables independientes evaluadas durante el proceso de electrohilado, reflejando las distintas condiciones operativas para la experimentación.

Las combinaciones experimentales a utilizar para la elaboración de las muestras se detallan en la Tabla VIII, en la cual se describen los valores de voltaje, distancia de inyección y concentraciones de solución.

TABLA VIII

MATRIZ EXPERIMENTAL DEL PROCESO

Codificación	Prueba	Voltaje (kV)	Distancia aguja-colector	% de concentración de solución
M1.1	1	14	9.5	
M1.2	2	14	13.5	
M1.3	3	14	15.5	
M1.4	4	10	9.5	
M1.5	5	10	13.5	M1
M1.6	6	10	15.5	
M1.7	7	6	9.5	
M1.8	8	6	13.5	
M1.9	9	6	15.5	

TABLA VIII

MATRIZ EXPERIMENTAL DEL PROCESO (continuación)

M2.1	10	14	9.5	
M2.2	11	14	13.5	
M2.3	12	14	15.5	
M2.4	13	10	9.5	
M2.5	14	10	13.5	M2
M2.6	15	10	15.5	
M2.7	16	6	9.5	
M2.8	17	6	13.5	
M2.9	18	6	15.5	
M3.1	19	14	9.5	
M3.2	20	14	13.5	
M3.3	21	14	15.5	
M3.4	22	10	9.5	
M3.5	23	10	13.5	M3
M3.6	24	10	15.5	
M3.7	25	6	9.5	
M3.8	26	6	13.5	
M3.9	27	6	15.5	

2.5. Plan de recolección de datos

2.5.1. Obtención de reciclado de polímero PLA

En la Tabla IX, se describe la adquisición del polímero seleccionado para el trabajo de investigación ya que es una etapa fundamental dentro del desarrollo del proyecto. Para ello, se realizó una búsqueda de fuentes que trabajen con ácido poliláctico (PLA), con el fin de obtener material residual o productos derivados de procesos de fabricación, tales como desperdicios o piezas mal procesadas que pudieran reutilizarse en el presente trabajo.

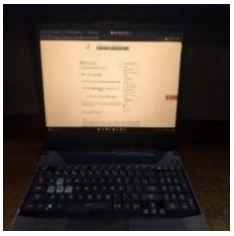
TABLA IX

OBTENCIÓN DE POLÍMEROS

Obtención de reciclado de polímero PLA	
Equipos y materiales	**Ubicación/ Nombre de la empresa**
- Celular	- Santa Rosa – Barrio Santa Marianita
- Computador	- Alcancías Tobar

TABLA IX

OBTENCIÓN DE POLIMEROS (continuación)

Procedimiento	
- Investigar lugares y empresas que realicen proceso de manufactura con PLA	
- Contactar con el personal encargado.	
- Trasladarse a la dirección proporcionada. - Adquirir el material necesario para la investigación.	

2.5.2. Elaboración de muestras previas

En este apartado se describe la elaboración de una muestra de solución polimérica preliminar, cuyo objetivo es determinar una relación peso/volumen (p/v) adecuada, que sirva como punto de partida para el desarrollo del trabajo experimental. Esta etapa inicial permite establecer las condiciones óptimas de disolución, asegurando de esta manera, una mezcla homogénea y estable para su posterior uso en el proceso de electrohilado.

En la Tabla X, se encuentra una descripción del proceso realizado.

TABLA X

MUESTRA PRELIMINAR

Elaboración de muestras	
Equipos y materiales	**Polímero y Solvente**
- Tubos de ensayo	- Ácido poliláctico (PLA)
- Balanza de precisión	- Cloroformo
- Jeringas de 10 ml	

Procedimiento

- Investigar una relación p/v confiable, de la cual partir la investigación.



- Realizar el triturado del polímero reciclado.



- Pesar los pellets realizados.



- Elaborar una muestra con una relación p/v.
- Por cada 10 ml de solvente, añadir 1 g de polímero.



- Mezclar los elementos hasta obtener una solución homogénea.



TABLA X

MUESTRA PRELIMINAR (continuación)

- Colocar 10 ml de solución polimérica en una jeringa.	
- Realizar un electrohilado previo.	

2.5.3. Trituración

La trituración del material reciclado constituye una etapa importante dentro del desarrollo experimental, puesto que permite reducir los elementos fabricados a base de PLA hasta obtener pellets de menor tamaño. Esta etapa contribuye a una disolución homogénea del polímero en el solvente, optimizando el tiempo requerido durante la preparación.

Para llevar a cabo este procedimiento, se seleccionó la máquina trituradora Precious Platic, una opción viable por su diseño compacto, ligereza y eficiencia. Este equipo tiene la capacidad de fragmentar polímeros en hojuelas de tamaño controlado de 3x10 mm [43].

2.5.4. Disolución polimérica

En el desarrollo del proyecto se realizaron tres variaciones en la concentración de las soluciones poliméricas orientadas a experimentación, las cuales se encuentran detalladas anteriormente en la Tabla VII.

La Tabla XI, puntualiza el procedimiento realizado para las disoluciones poliméricas utilizadas en la experimentación.

TABLA XI

PROCEDIMIENTO PARA LA DISOLUCIÓN

Disolución polimérica	
Equipos	**Materiales**
- Agitador	- Pellets de PLA
- Balanza de precisión.	- Cloroformo
Procedimiento	
- Pesar la cantidad necesaria del polímero triturado.	
- Realizar las muestras poliméricas según la Tabla VII. - Cada muestra debe estar en botellas de vidrio etiquetadas.	
- Mezclar entre 2 a 3 horas dependiendo de la cantidad de polímero. - Posterior a la disolución total, dejar reposar, para evitar burbujas que afecten al proceso.	

2.5.5. Ensayo de viscosidad

Las soluciones poliméricas preparadas serán analizadas utilizando un viscosímetro, con el objetivo de obtener datos que permitan comprender cómo este factor influye en la formación de fibras durante el proceso de electrohilado.

Este parámetro resulta de gran importancia, ya que la viscosidad de la solución tiene un papel determinante en la calidad y uniformidad de las fibras que se generan. Por lo cual, la medición de cada una de las soluciones elaboradas será de gran importancia, con el fin de identificar cual presenta las condiciones más adecuadas para la producción de membranas nanofibrosas.

En la Tabla XII, se detalla el procedimiento para realizar la medición de viscosidad de las diferentes soluciones poliméricas realizadas.

TABLA XII

ENSAYO DE VISCOSIDAD

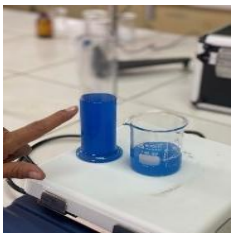
Ensayo de viscosidad	
Equipos y materiales	**Soluciones a ensayar**
- Viscosímetro - Vasos de precipitación de 300 ml - Papel de cocina para limpieza	- Soluciones poliméricas con diferentes concentraciones peso/volumen - Cloroformo
Procedimiento	
- Armar el equipo con sus implementos necesarios y colocarlo en una superficie plana - Nivelar el equipo haciendo uso del nivel que se encuentra ubicado en la parte superior del cabezal.	
- Agitar soluciones poliméricas para una mezcla y medición adecuada. - Verter las soluciones poliméricas realizadas en un vaso de precipitación de 300 ml.	
- Calibrar el equipo. - Determinar el husillo adecuado para cada solución, mediante ensayos previos.	

TABLA XII

ENSAYO DE VISCOSIDAD (continuación)

- Para determinar el husillo necesario, es importante realizar pruebas preliminares, lo que ayudara a la elección del husillo adecuado para cada solución.
- las pruebas preliminares se las realizara con los 4 husillos que la máquina posee, siendo el 1 el utilizado para medir soluciones menos viscosas.



- Realizar 3 mediciones de cada solución para definir un promedio.
- El equipo incluye un termostato el cual debe ser colocado en la solución polimérica, para poder medir la temperatura y de esta manera validar en ensayo.
- Después de cada medición realizada, se debe hacer una limpieza de los implementos que se encuentran en contacto con la solución, llegando a prevenir datos erróneos.
- Para aprobar las mediciones realizadas, el porcentaje de aceptación deber encontrarse en un rango de 30% y 80%, esta norma está definida por el fabricante.



El ensayo de viscosidad de las soluciones poliméricas se lo realizó en el laboratorio de Química de la carrera de Mecánica, la instalación está ubicada en la Universidad Técnica de Ambato en la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

2.5.6. Ensayo de Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier

Para el desarrollo del ensayo FTIR se emplearon las soluciones poliméricas elaboradas previamente, descritas en la Tabla VII. Este análisis tuvo como finalidad identificar la composición química de cada solución. De igual manera, se realizó el estudio individual de los componentes de empleados en la preparación de las soluciones, con el propósito de comparar sus espectros y determinar interacciones entre el polímero y el solvente.

Los ensayos de espectroscopia se realizaron en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato utilizando el equipo correspondiente para este tipo de análisis. En la Tabla XIII, se detalla el procedimiento seguido durante la ejecución del ensayo.

TABLA XIII

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE ESPECTROMETRÍA FTIR

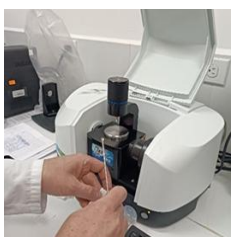
Ensayo de Espectrometría FTIR	
Equipos y materiales	**Soluciones y elementos a ensayar**
- Equipos de ensayos FTIR. - Algodón. - Software PerkinElmer Spectrum.	- Soluciones poliméricas detalladas en la Tabla VIII. - Cloroformo - PLA
Procedimiento	
- Abrir el programa PerkinElmer Spectrum. - Encender el equipo de ensayos.	
- Realizar una limpieza de las superficies que van a estar en contacto. - Calibrar el equipo, para obtener datos correctos. - Despues de cada prueba realizada, se debe limpiar los elementos en contacto.	

TABLA XIII

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE ESPECTROMETRIA FTIR (continuación)

- Colocar en el colector una muestra pequeña para realizar en ensayo. - Guardar datos obtenidos en una memoria USB	

2.5.7. Obtención de membranas mediante electrohilado vertical

En la Tabla XIV, se detalla la secuencia de actividades utilizadas para la producción de membranas mediante la generación de fibras por electrohilado.

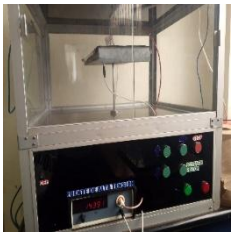
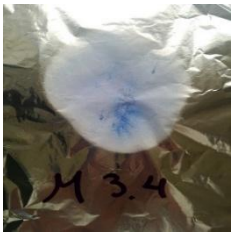
TABLA XIV

OBTENCIÓN DE MEMBRANAS MEDIANTE ELECTROHILADO VERTICAL

Obtención de membranas mediante electrohilado vertical	
Equipos y materiales	**Soluciones a ensayar**
- Máquina de electrohilado - Papel Aluminio - Jeringas de 10 ml	- Soluciones poliméricas realizadas con diferentes concentraciones p/v.
Procedimiento	
- Realizar una agitación manual de las soluciones para una combinación adecuada.	
- Colocar 10 ml de solución polimérica en una jeringa.	

TABLA XIV

OBTENCIÓN DE MEMBRANAS MEDIANTE ELECTROHILADO VERTICAL (continuación)

- Cortar papel aluminio de 23 x 30 cm - Realizar 27 capas para muestreo.	
- Colocar la capa en el colector. - Conectar el polo negativo de la fuente de voltaje, en el colector.	
- Situar la jeringa en el lugar designado de la máquina de electrohilado. - Conectar el polo positivo de la fuente de voltaje, en la punta metálica de la aguja	
- Parametrizar los datos mediante la Tabla VII.	
- Encender la máquina de electrohilado, teniendo en cuenta las normas de seguridad. - Iniciar el proceso de electrohilado.	
- Codificar cada muestra producida mediante el uso de un marcador permanente.	

2.5.8. Caracterización física

En esta etapa se llevará a cabo la caracterización de las membranas poliméricas obtenidas mediante electrohilado vertical, con el objetivo de evaluar sus propiedades morfológicas y estructurales. Durante esta fase se realizará una inspección visual de las membranas, complementada con los ensayos experimentales realizados, con el propósito de recopilar información sobre su uniformidad y apariencia

Los resultados y observaciones obtenidas serán registrados en una lista de verificación, lo que permitirá tener un control adecuado de los datos experimentales y facilitar su respectivo análisis.

2.5.9. Micrografía

Para la obtención de datos sobre la morfología y estructura de las membranas poliméricas obtenidas mediante electrohilado, se empleará la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), como muestra la Tabla XV. Esta herramienta resulta altamente útil, ya que permite obtener imágenes de superficies de distinta naturaleza, tales como polímeros, cerámicos y materiales compuestos, proporcionando información a escala micrométrica y nanométrica.

TABLA XV

ENSAYO DE MICROGRAFÍA SEM

Ensayo de Micrografía SEM	
Equipos y materiales	**Elementos a ensayar**
- Microscopio SEM - Software Vega Tescan Control. - Tijera - Cinta adhesiva	- Muestras electrohiladas

TABLA XV

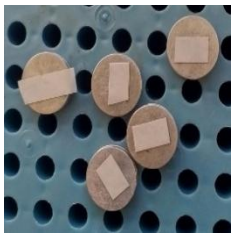
ENSAYO DE MICROGRAFÍA SEM (continuación)

Procedimiento

- Encender el equipo.
- Abrir el paso del Nitrógeno utilizado para la cámara de vacío
- Iniciar el programa VegaTC.



- Cortar un fragmento pequeño de la cinta adhesiva y colocarla en el porta muestras del equipo.



- Cortar una sección pequeña de las muestras.
- Colocar las muestras electrohiladas en los porta muestras del equipo.
- Catalogar cada inserto con una señal visible de la muestra correspondiente.
- Ajustar y fijar los porta muestras.
- Cerrar la cámara del microscopio.

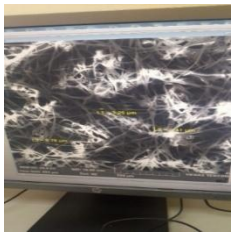


- Generar el vacío de la cámara para poder realizar el ensayo.
- Ajustar parámetros de medición como resolución, aumento, velocidad de barrido, entre otros. Buscando una visualización adecuada de la muestra.
- Sacar captura de la muestra analizada.



TABLA XV

ENSAYO DE MICROGRAFÍA SEM (continuación)

- Realizar las mediciones de las fibras obtenidas durante el proceso de electrohilado, haciendo uso de las herramientas propias del programa.	

2.5.10. Análisis estadístico

Posteriormente, se llevará a cabo un análisis estadístico de los registros obtenidos, empleando varios métodos analíticos de tratamiento de datos con el fin de interpretar los resultados experimentales.

Mediciones de espesor: este análisis se realizará con la finalidad de evaluar la homogeneidad de las membranas realizadas. Para ello, se hará uso de micrómetro de precisión, mediante el cual se obtendrán diversas mediciones en distintos puntos de cada muestra. Con los datos obtenidos se calculará la media aritmética ($\bar{x}$) y la desviación estándar S, estos parámetros permitirán determinar la uniformidad y consistencia de las membranas elaboradas [44].

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \tag{1}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{2}$$

n : Es el número total de datos.

x_i : Es la suma de todos los datos.

Método Taguchi

Cálculo de la Señal/Ruido (S/N)

Taguchi propone las siguientes fórmulas para el caso “mientras más pequeño, mejor”.

$$\frac{S}{N} = -10 * \log_{10}\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \tag{3}$$

Donde y_i son los diámetros medidos durante los ensayos realizados en este caso 6 mediciones.

Cálculo del Factor A

$$\mu_M = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \quad (4)$$

x_i son los diámetros promedios obtenidos con las diferentes concentraciones.

n es el número de muestras realizadas respectivas a concentración.

Cálculo del Factor B

$$\mu_B = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \quad (5)$$

x_i son los diámetros promedios obtenidos con los diferentes voltajes utilizados.

n es el número de muestras realizadas respectivas a cada voltaje.

Cálculo del Factor C

$$\mu_C = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \quad (6)$$

x_i son los diámetros promedios obtenidos con las diferentes distancias de inyección.

n es el número de muestras realizadas respectivas a cada distancia.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Interpretación y tabulación de los resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados a las soluciones poliméricas y su desempeño durante la formación de fibras para la obtención de membranas nanofibrosas. Este apartado incluye datos provenientes de pruebas de viscosidad, micrografías, espectroscopía FTIR y evaluación visual. La información recopilada se emplea para establecer una correlación entre las variables estudiadas, con el propósito de identificar su influencia sobre las características finales de las muestras realizadas. A partir de este análisis, se determinan las condiciones operativas más adecuadas para la producción de nanofibras mediante el uso del material estudiado.

3.2. Resultados de Ensayo de viscosidad

3.2.1. Recolección de datos obtenidos mediante en ensayo de viscosidad

En este ensayo se emplearon los husillos No. 1 – 2 y 3, configurando velocidades operativas de 12 y 60 RPM. Cada husillo tiene la capacidad de ajustarse a diferentes soluciones, permitiendo obtener la validación de las disoluciones evaluadas con un porcentaje de confiabilidad entre 30 y 80 % [46], el cual es el rango recomendado por el fabricante. Se realizaron tres mediciones de cada muestra con la finalidad de asegurar la confiabilidad de los datos obtenidos.

3.2.2. Análisis de ensayo de viscosidad

En la Tabla XVI, se presentan los datos obtenidos en el ensayo de viscosidad, los cuales permitieron analizar la relación existente entre la cantidad de polímero y el volumen de solvente que influye de manera directa en el comportamiento de las soluciones poliméricas preparadas.

TABLA XVI

DATOS RECOLECTADOS - VISCOSIDADES

# de prueba	Muestra	Cantidad de PLA (g)	Volumen de solvente (ml)	Viscosidad (mPa.s)
1	M1	5	100	23.06
2				23.09
3				23.03
4	M2	10		190.9
5				190.5
6				190.6
7	M3	20		5301.9
8				5308.3
9				5301.2
10	Cloroformo	0		1.36
Desviación estándar				2518.78

En la (Fig. 6), se observa la influencia que ejerce la variación de la cantidad de polímero sobre la viscosidad de la solución. Mientras incrementa la masa de PLA en el solvente, la viscosidad aumenta de manera proporcional.

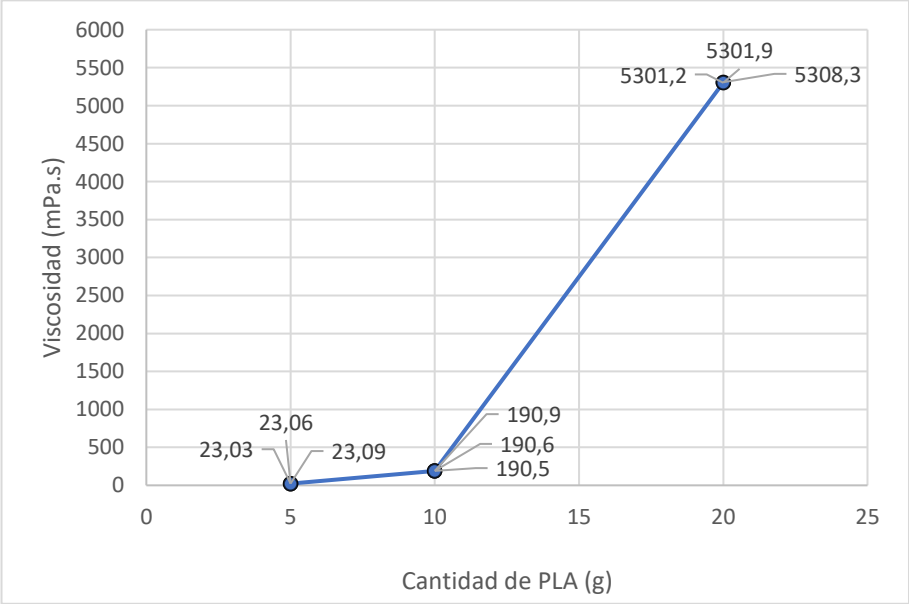


Fig. 6. PLA - Viscosidad

El análisis comparativo muestra que la cantidad de PLA utilizada influye directamente en la viscosidad de las soluciones poliméricas. Las concentraciones más altas de polímero dan lugar a soluciones de mayor viscosidad, lo cual es lógico dada la mayor densidad y consistencia del sistema.

También es importante señalar que el cloroformo ayuda a disolver el polímero, lo que permite preparar las soluciones necesarias para las pruebas de electrohilado. Sin embargo, dado que este compuesto es volátil, no contribuye de manera significativa a la viscosidad del medio. Por lo tanto, se puede deducir que la viscosidad depende principalmente de la cantidad de polímero presente.

3.3. Resultados de ensayo FTIR

3.3.1. Comparativa de espectro FTIR (Solvente/ Polímero /Solución)

En este apartado se realiza la comparación entre los espectros obtenidos del solvente, polímero y las soluciones poliméricas con diferentes concentraciones realizadas durante este proyecto experimental. Para así determinar si la viscosidad de las soluciones influye en las mediciones del ensayo FTIR.

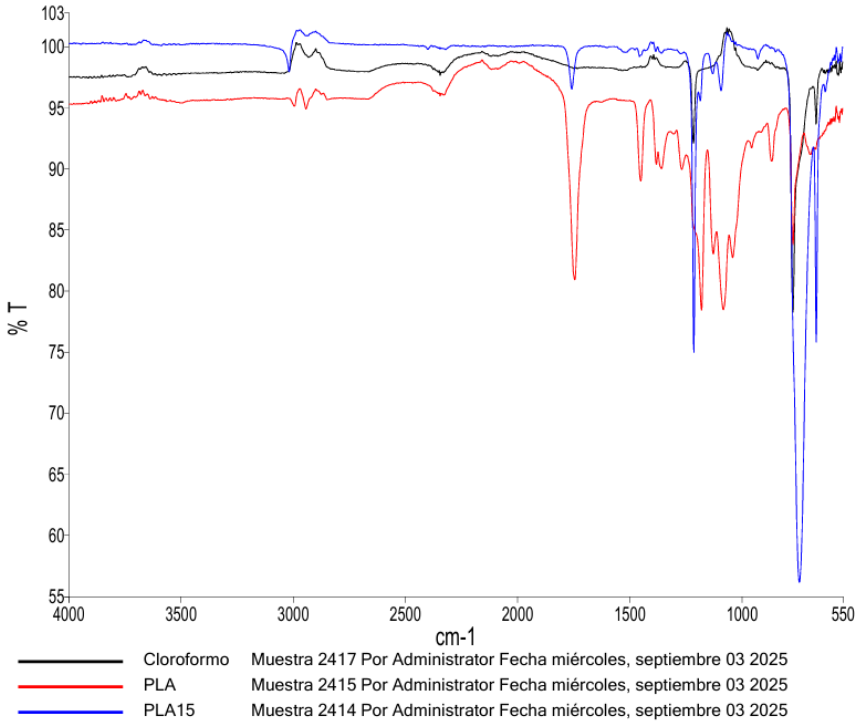


Fig. 7. Espectro (Solvente/ Polímero /Solución M1)

La (Fig. 7), muestra la comparativa de los espectros donde se observa que el PLA presenta sus bandas características bien definidas, especialmente la señal de 1750 cm^{-1} y las vibraciones C-O en la zona de 1200-1100 cm^{-1}. Por otra parte, el

cloroformo posee un patrón más simple con unas vibraciones por debajo de 800 cm^{-1}. El espectro de la solución polimérica combina los dos perfiles, conservando la estructura que el PLA tiene, pero también evidenciando la presencia de solvente residual.

El espectro representativo de la solución mantiene las señales principales del polímero, mostrando de esta manera que la estructura química no se modifica durante el proceso de la disolución. Las bandas del C=O y las vibraciones C-O se encuentran en las mismas posiciones que en el PLA puro, corroborando la estabilidad molecular. Sin embargo, se miran pequeñas variaciones las cuales se atribuyen a la interacción física entre el polímero y el solvente durante la preparación.

El espectro del solvente muestra señales en la parte baja del espectro, entre 780 y 650 cm^{-1}, donde predominan las vibraciones C-CL. Estas bandas también se identifican en la solución polimérica, aunque con una intensidad más baja, lo que evidencia la presencia de solvente residual después del proceso de evaporación. La combinación de ambos espectros demuestra que la interacción entre el polímero y el solvente es únicamente física, sin formar nuevos compuestos.

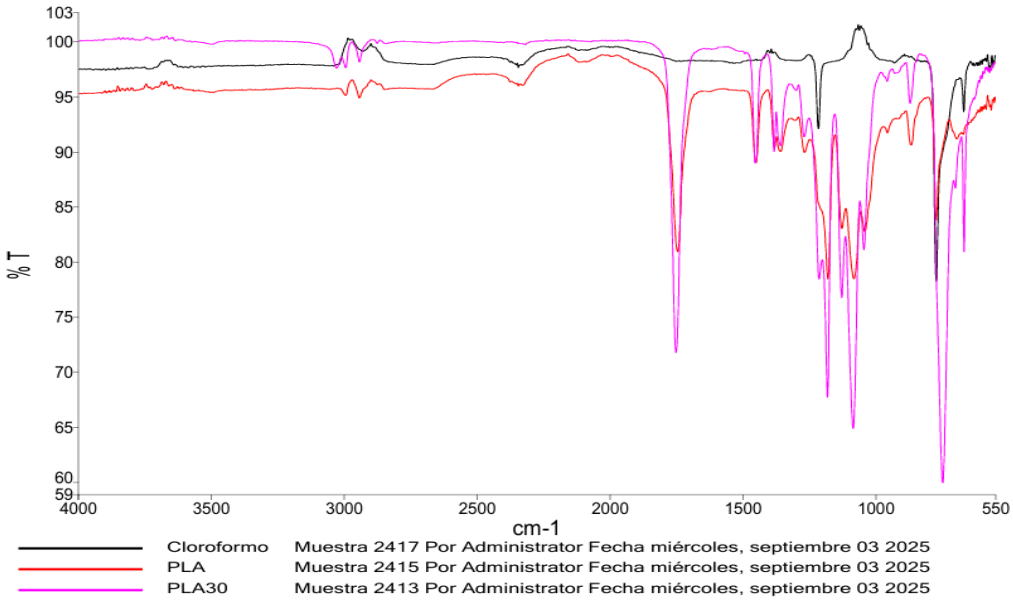


Fig. 8. Espectro (Solvente/ Polímero /Solución M2)

En la (Fig. 8), se observa que el espectro del PLA mantiene picos definidos, mientras que el solvente posee un perfil más sencillo y concentrado en la zona baja, estos están

asociados a vibraciones C-Cl. La solución polimérica combina estos dos comportamientos, donde muestra las bandas del polímero con pequeños cambios y la presencia residual del solvente.

El espectro de la solución polimérica conserva las señales esenciales del polímero, demostrando de esta manera que, la estructura química del polímero no sufre alteraciones durante la disolución. Pero, la intensidad y forma de ciertas bandas tienen cambios ligeros, reflejando la interacción física que hay entre el PLA y el cloroformo.

Las bandas del solvente, aunque se encuentran atenuadas siguen presentes en la solución polimérica. Lo que indica que, pese a su rápida evaporación, una pequeña cantidad de cloroformo se queda atrapado temporalmente en la matriz.

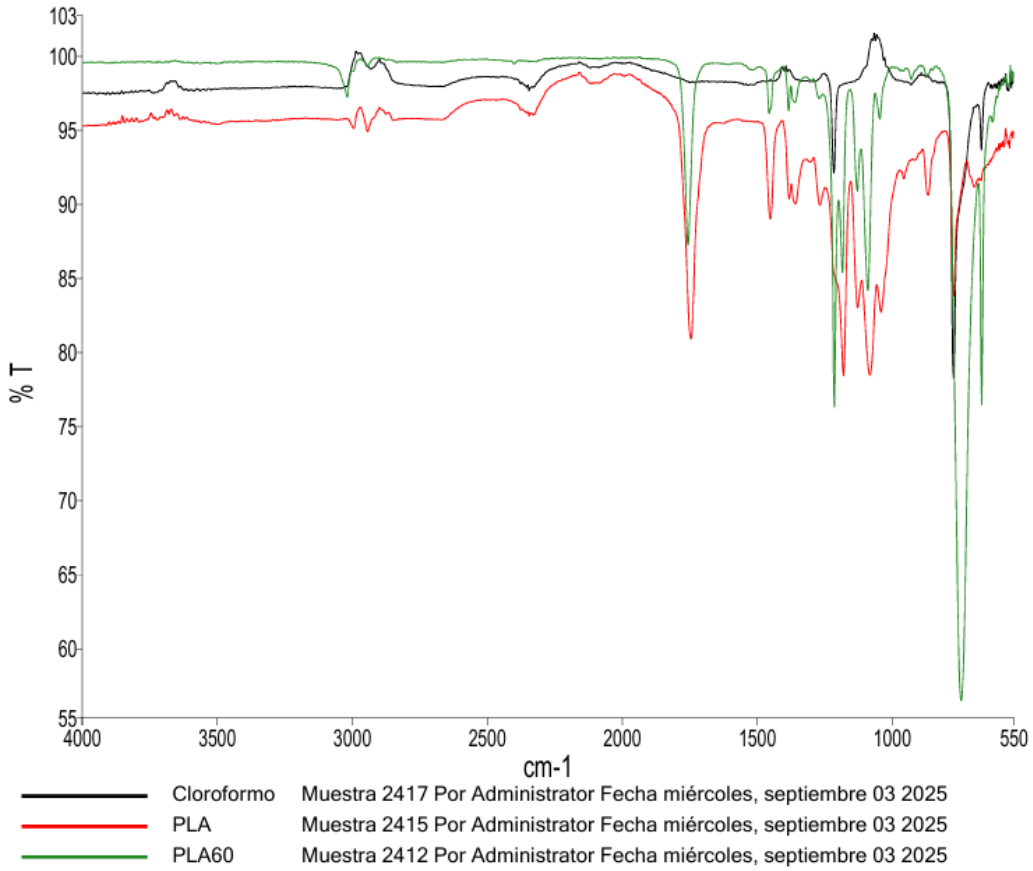


Fig. 9. Espectro (Solvente/ Polímero /Solución M3)

Mediante el espectro del PLA mostrado en la (Fig. 9), se observa que el material mantiene sus bandas características cuando el polímero se encuentra disuelto en

cloroformo. Se puede contemplar que la estructura química no sufre alteraciones durante el proceso de disolución, aun en concentraciones de polímero elevadas.

La solución con más viscosidad muestra bandas más intensas y bien definidas en comparación con las otras mezclas donde las concentraciones de polímero son menores, lo que indica una mayor cantidad de enlaces vibracionales del polímero, al predominar el PLA en esta solución confirma una composición homogénea del material.

3.3.2. Comparativa de espectro FTIR de Soluciones poliméricas

A partir de los espectros obtenidos de las soluciones poliméricas con diferentes concentraciones se realizará un análisis comparativo entre las grafica obtenidas. Para poder determinar si la viscosidad de cada solución tiene una influencia significativa en el ensayo realizado.

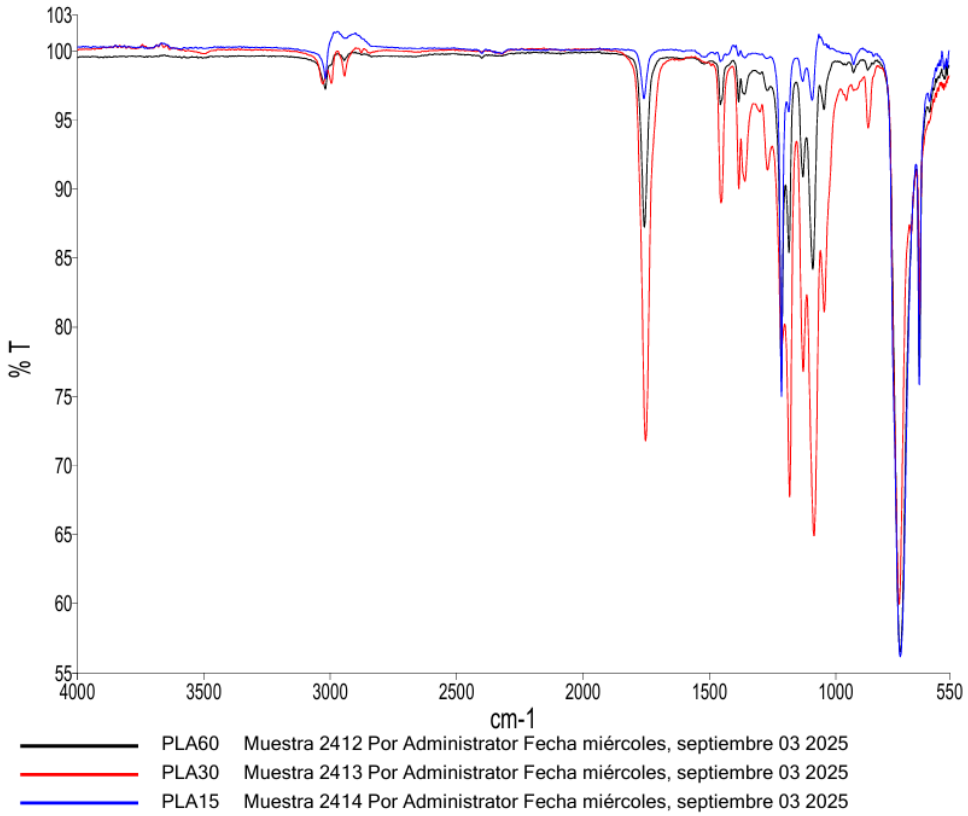


Fig. 10. Espectro de las soluciones poliméricas

Mediante la comparación espectral general de las soluciones poliméricas presentada en la (Fig. 10), se puede observar que todos los espectros mantienen las bandas características del polímero PLA, de manera particular las bandas que están asociadas al estiramiento del grupo carbonilo y las vibraciones C-O. La superposición de los espectros muestra que la estructura molecular del PLA no se encuentra alterada por la variación en las concentraciones del material, confirmando de esta manera que durante el proceso de disolución no existe degradación química significativa.

La profundidad de los picos va aumentando cuando existe un incremento de la cantidad de PLA en la solución, como se nota en los espectros correspondientes a PLA30 Y PLA60. Donde las señales se vuelven más intensas y definidas, lo que se relaciona con la presencia de mayor cantidad de enlaces vibracionales presentes en la solución. Aunque el espectro del PLA15 manifiesta picos más suaves, que denotan una menor densidad polimérica en la mezcla, esta no tiene perdidas de sus características funcionales.

Se contempla que las tres soluciones presentan un comportamiento espectral similar, indicando que el solvente utilizado cumple eficazmente su función en la mezcla, permitiendo realizar una disolución uniforme del polímero. La diferencia notable entre los espectros se relaciona con la intensidad de los picos y no con la presencia de nuevas bandas, demostrando así que, el aumento de la concentración únicamente modifica la absorción relativa, sin producir reacciones químicas indeseadas ni cambios en la estructura del polímero.

3.3.3. Análisis comparativo de resultados con datos bibliográficos.

La discusión de los resultados obtenidos de los espectros FTIR para las soluciones poliméricas de PLA que fueron diluidas en cloroformo se realizó con la comparación de datos investigados en artículos científicos. El PLA presenta picos característicos y dominantes del estiramiento carbonilo C=O alrededor de 1735-1760 cm^{-1}, donde el valor cercano de aceptación se encuentra en 1750 cm^{-1} [47]. Como se muestran en la (Fig. 11).

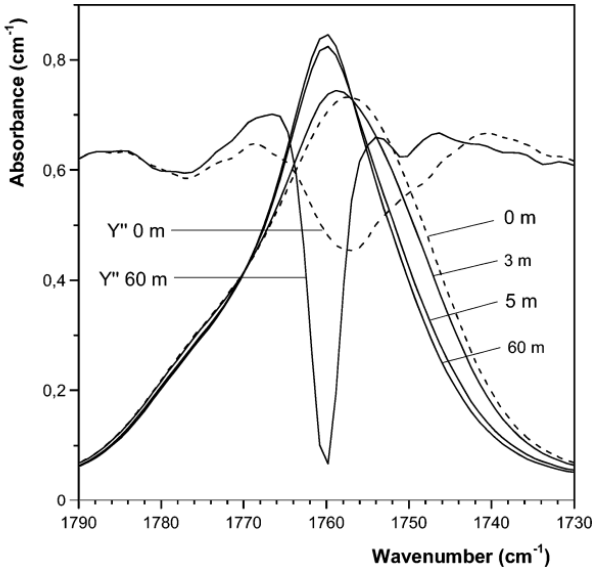


Fig. 11. Región de estiramiento del carbonilo del PLLA y sus derivados secundarios [47]

Durante esta investigación los espectros analizados poseen picos entre 1744 y 1758 cm^{-1}, confirmando así la presencia adecuada del grupo éster del polímero PLA, sin signos de degradación significativa ni interacción química con el solvente que pueda afectar la estructura del material.

La zona observada en las muestras espectrales durante el trabajo está entre 1200 y 1000 cm^{-1} que presentaron múltiples bandas relacionadas con las vibraciones C-O-C y C-O que pertenecen a los enlaces éster. La (Fig. 12), es referente a caracterizaciones realizadas al polímero PLA, donde se menciona que las bandas suelen ubicarse en regiones entre 1180-1090 cm-1 [48]. Llegando de esta manera a coincidir con los valores obtenidos y observados en las soluciones evaluadas durante el presente trabajo. La presencia de estas señales muestra que la estructura química del material se mantiene estable durante la disolución polimérica, sin darse modificaciones en la estructura que se puedan observar durante ensayos como el FTIR.

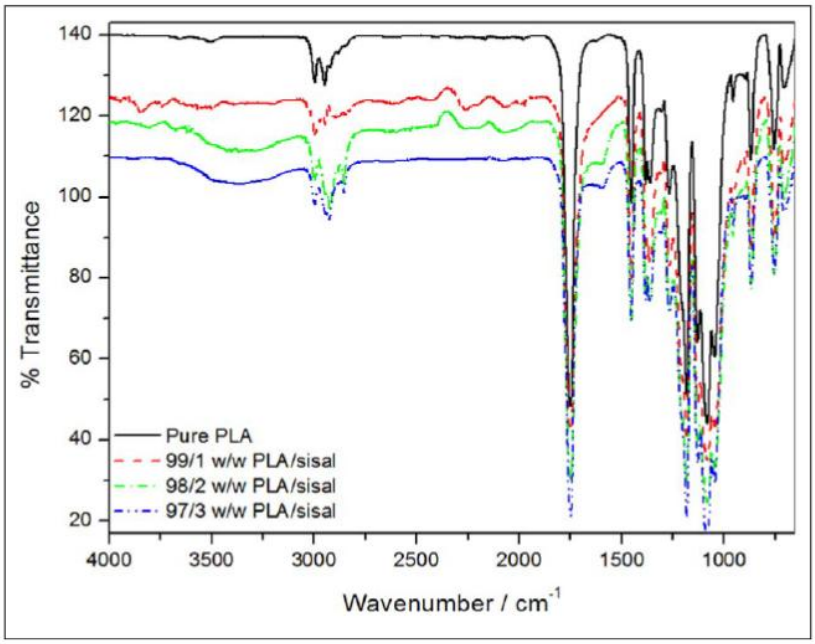


Fig. 12. Espectros infrarrojos FTIR del poli(ácido láctico) PLA [48]

La (Fig. 13), contiene datos sobre el cloroformo donde se observa sus picos característicos v(CH)= 3019 cm^{-1}, modo de flexión (CH) =1215 cm^{-1} y modos C-Cl con zonas entre 700-650 cm-1 [49], estos picos se encuentran presentes con una intensidad baja en los espectros de las soluciones.

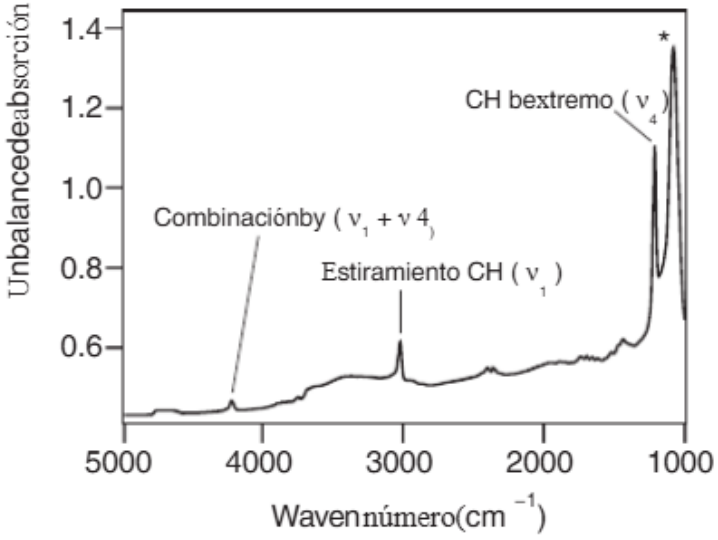


Fig. 13. Espectro FTIR del cloroformo líquido [49]

La aparición del espectro del solvente confirma que existe residuos en la matriz polimérica, en muestras con mayor concentración de PLA, en comparación, las

soluciones más concentradas como el PLA 60 muestran una pequeña reducción en la definición de los picos del solvente, sugiriendo de esta manera que existe una retención más fuerte del cloroformo dentro de la red macromolecular del polímero. Por lo que las coincidencias confirman la asignación de las bandas y la consistencia de los resultados experimentales.

3.4. Resultados de ensayo de electrohilado vertical

3.4.1. Análisis del proceso de electrohilado

En la Tabla XVII, se presenta el registro de los datos obtenidos a partir de las muestras elaboradas mediante el proceso de electrohilado. Esta tabla agrupa las mediciones del diámetro y espesor correspondientes a cada membrana producida, permitiendo observar de manera organizada las variaciones generadas por los distintos parámetros operativos utilizados. Cabe mencionar que los registros fueron realizados mediante el uso de un flexómetro y un micrómetro, lo que permitió obtener valores confiables y precisos para interpretar el comportamiento de cada muestra.

TABLA XVII

DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE ELECTROHILADO

Prueba	Codificación	Diámetro efectivo de la membrana (cm)	Espesor (µm)
1	M1.1	15	0.004
2	M1.2	10	0.020
3	M1.3	10	0.009
4	M1.4	13	0.006
5	M1.5	6	0.019
6	M1.6	8	0.003
7	M1.7	6.5	0.011
8	M1.8	3.5	0.007
9	M1.9	5	0.010
10	M2.1	12	0.015
11	M2.2	15.5	0.011
12	M2.3	17.5	0.014
13	M2.4	14	0.017
14	M2.5	14.5	0.017
15	M2.6	15	0.014
16	M2.7	13.5	0.020
17	M2.8	5.5	0.021

TABLA XVII

DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE ELECTROHILADO (continuación)

18	M2.9	7	0.013
19	M3.1	6.5	0.032
20	M3.2	10	0.011
21	M3.3	14.5	0.012
22	M3.4	10	0.010
23	M3.5	14	0.012
24	M3.6	14	0.010
25	M3.7	5	2.511
26	M3.8	6	1.519
27	M3.9	5	1.509

A. Análisis de los diámetros registrados

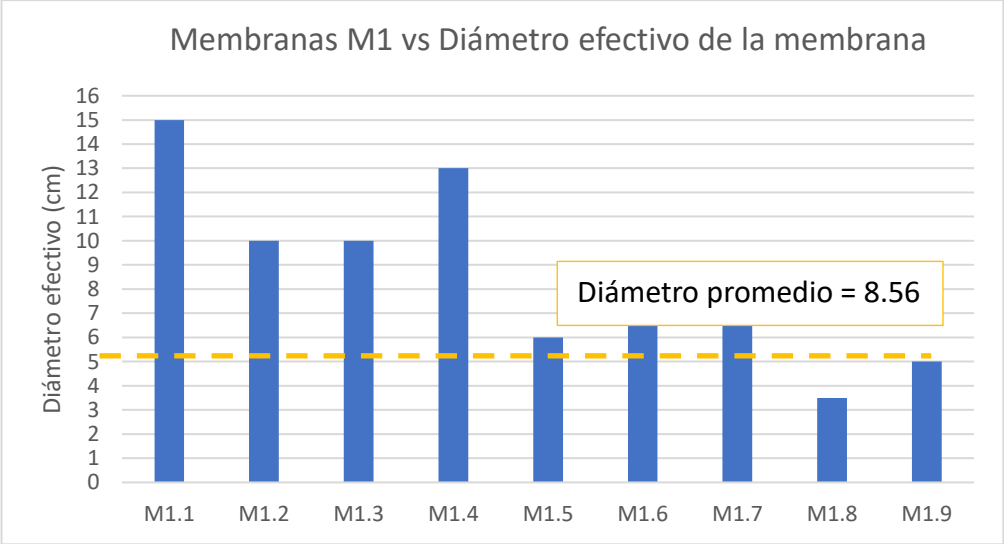


Fig. 14. Membranas M1 vs Diámetro efectivo

En el conjunto referente a la solución M1, los diámetros muestran una variación entre 3.5 y 15 cm, tal como se observa en la (Fig. 14), reflejando una respuesta a los cambios de voltaje y distancia aguja-colector utilizados. Las membranas con diámetros pequeños exhiben inestabilidad del chorro debido a la baja concentración del polímero, el diámetro promedio indica una tendencia de membranas más compactas y un área efectiva menor.

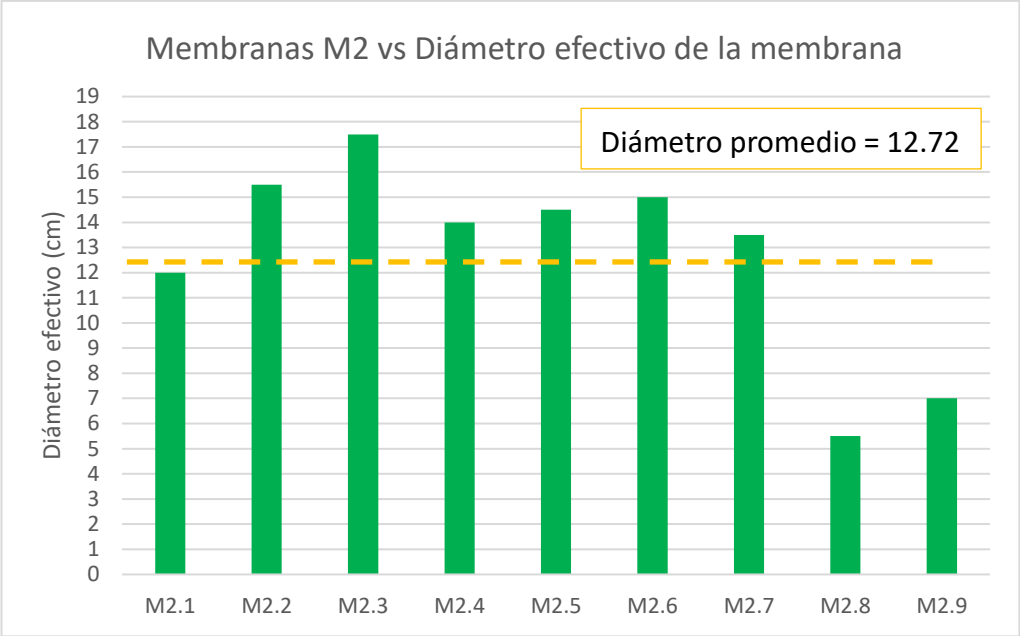


Fig. 15. Membranas M2 vs Diámetro efectivo

La (Fig. 15), muestra que el grupo M2 presenta diámetros más extensos, entre 6.5 y 17.5 cm, reafirmando un comportamiento más estable del chorro. Una concentración más alta de PLA incrementa la viscosidad y un mayor voltaje favorece una deposición más amplia. Estas membranas demuestran un crecimiento en su área, resultado de parámetros más compatibles con la formación de un cono de Taylor continuo.

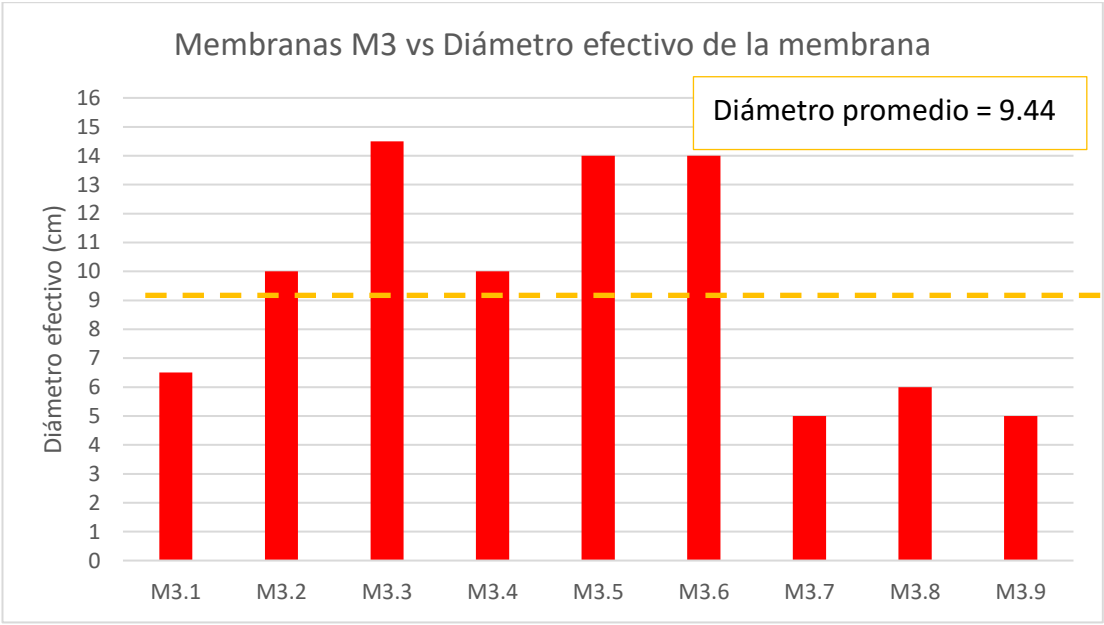


Fig. 16. Membranas M3 vs Diámetro efectivo

En el grupo M3, los diámetros registrados, visibles en la (Fig. 16), se encuentran entre 5 y 14.5 cm, con un promedio de 9.44 cm. Esto evidencia estabilidad moderada del proceso donde el área es mayor que las del grupo M1, pero menor uniformidad que M2. Aunque la solución posee ciertas características adecuadas para generar membranas amplias con ciertos parámetros óptimos de operación, sigue siendo propenso a cambios en el estiramiento del chorro y la deposición final.

B. Análisis de los Espesores registrados

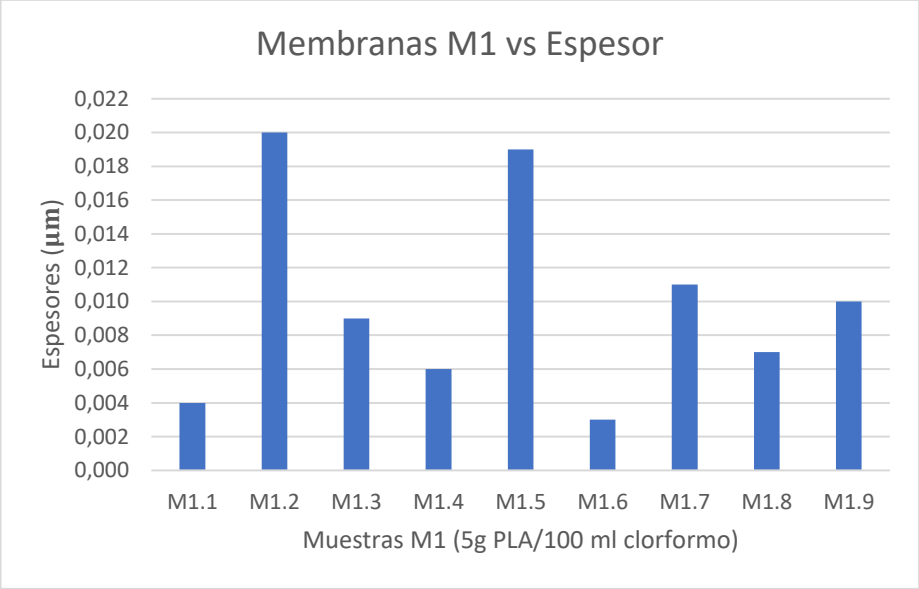


Fig. 17. Membranas M1 vs Espesor

La (Fig. 17), corresponde a las membranas del grupo M1, se observa que los espesores obtenidos se mantienen dentro de un rango reducido, con un promedio de 0.10 micras, lo que evidencia una estabilidad aceptable del proceso bajo las condiciones empleadas. Aunque existen variaciones puntuales entre las muestras, la mayoría mantiene una distribución uniforme, lo que indica que, para estas soluciones, el proceso de electrohilado genera membranas delgadas.

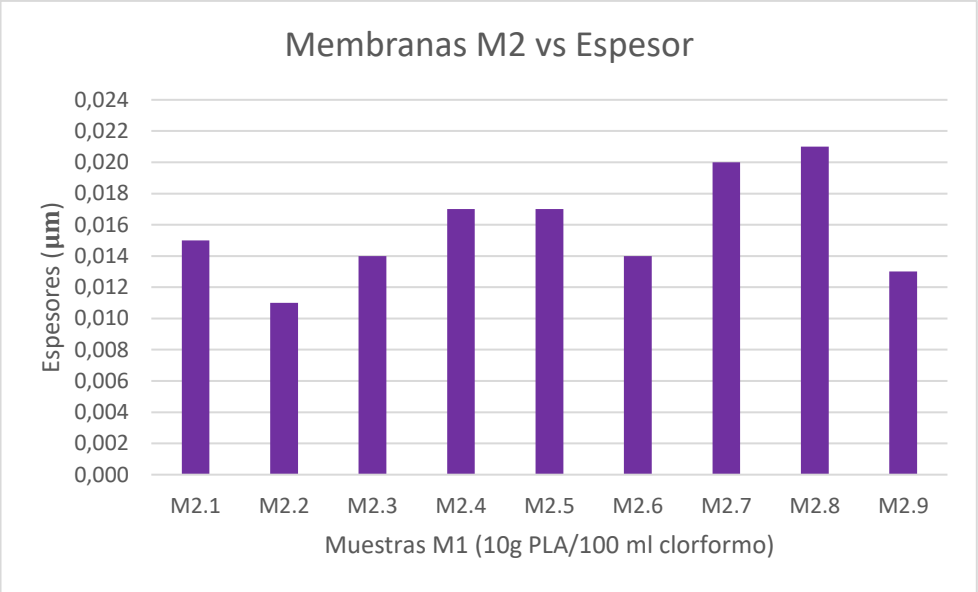


Fig. 18. Membranas M2 vs Espesor

La (Fig. 18), muestra que las membranas M2 Alcanzan espesores ligeramente superiores, con un promedio de 0,016 micras, reflejando el efecto directo del incremento en la concentración de polímero dentro de la solución. A pesar del aumento de espesor, la distribución sigue siendo consistente, sin desviaciones extremas entre muestras. Este comportamiento sugiere que la solución favorece una deposición más densa del material, manteniendo un control adecuado sobre la uniformidad estructural

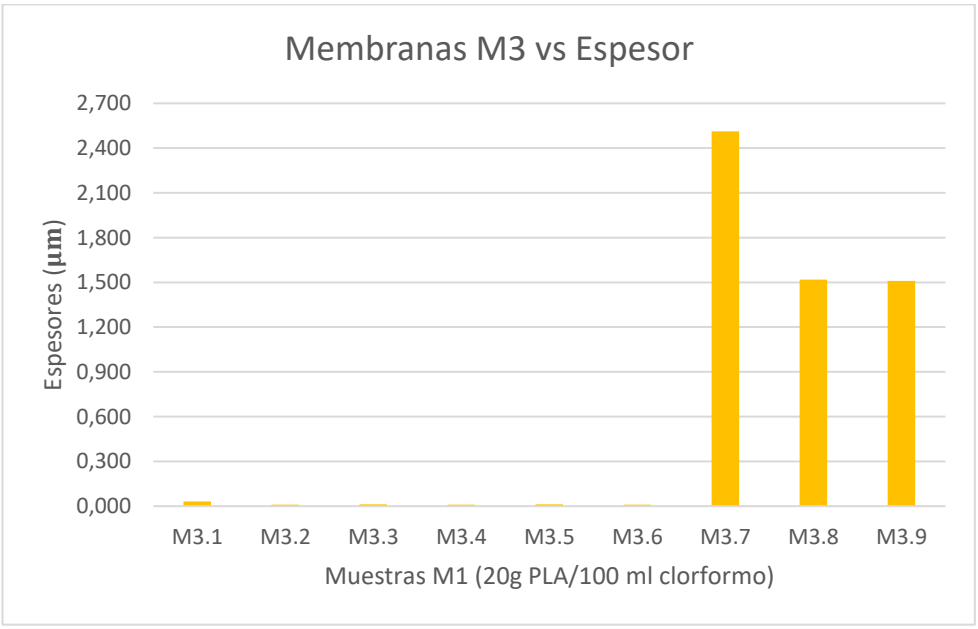


Fig. 19. Membranas M3 vs Espesor

La (Fig. 19), correspondiente a las membranas del Grupo M3, donde se evidencia un cambio drástico el espesor promedio que aumenta a 0,625 micras valor muy superior al de los grupos anteriores. Esta variación significativa proviene del incremento notable en la concentración de PLA que produce fibras más compactas y una acumulación excesiva sobre el colector en ciertas pruebas, además de algunas membranas exhiben espesores altos por la deposición del polímero sin la formación de fibras.

Se realizo una selección preliminar de las membranas obtenidas, descartando aquellas que presentaron defectos estructurales evidentes y puedan ser replicadas con fines aplicativos. La Tabla XVIII, muestra el filtro inicial mediante una inspección visual que permitió identificar las muestras cuya morfología resultaba inadecuada, se representó los datos mediante un código binario donde las muestras codificadas que tengan una sumatoria total, mayor o igual a 2, fueron aceptadas caso contrario han sido rechazadas.

TABLA XVIII

CRITERIO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO

Codificación	No se evidencia la presencia de perlas o grumos	Formación de membrana constante	Aspecto visual	Sumatoria	Aceptado/ rechazado
M1.1	0	0	0	0	Rechazado
M1.2	0	0	0	0	Rechazado
M1.3	0	0	0	0	Rechazado
M1.4	0	0	0	0	Rechazado
M1.5	0	0	0	0	Rechazado
M1.6	0	0	0	0	Rechazado
M1.7	0	0	0	0	Rechazado
M1.8	0	0	0	0	Rechazado
M1.9	0	0	0	0	Rechazado
M2.1	0	1	1	2	Aceptado
M2.2	0	1	1	2	Aceptado
M2.3	0	1	0	1	Rechazado
M2.4	0	1	1	2	Aceptado
M2.5	0	1	1	2	Aceptado

TABLA XVIII

CRITERIO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO (continuación)

M2.6	0	1	1	2	Aceptado
M2.7	0	1	1	2	Aceptado
M2.8	0	0	0	0	Rechazado
M2.9	0	0	0	0	Rechazado
M3.1	0	0	0	0	Rechazado
M3.2	0	0	0	0	Rechazado
M3.3	0	1	1	2	Aceptado
M3.4	0	1	0	1	Rechazado
M3.5	0	1	1	2	Aceptado
M3.6	0	1	1	2	Aceptado
M3.7	0	0	0	0	Rechazado
M3.8	0	0	0	0	Rechazado
M3.9	0	0	0	0	Rechazado

Por el contrario, las membranas poliméricas que visualmente presentaron buenas características fueron aprobadas para un análisis posterior mediante Microscopia SEM. El porcentaje de aceptación y rechazo muestra que únicamente el 33% de las membranas producidas se las considera como aceptables y, por otra parte, el 67% han sido rechazadas.

3.5. Resultados del ensayo de microscopia SEM

3.5.1. Recolección de datos.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de microscopia SEM. La Tabla XIX, agrupa las membranas seleccionadas como aceptables tras la inspección visual previa, considerando su homogeneidad, morfología y la menor cantidad de defectos.

TABLA XIX

MUESTRAS SELECCIONADAS PARA ENSAYO SEM

Codificación	**Voltaje (kV)**	**Distancia aguja-colector (cm)**
M2.1	14	9.5
M2.2	14	13.5
M2.4	10	9.5
M2.5	10	13.5

TABLA XIX

MUESTRAS SELECCIONADAS PARA ENSAYO SEM (continuación)

M2.6	10	15.5
M2.7	6	9.5
M3.3	14	15.5
M3.5	10	13.5
M3.6	10	15.5

3.5.2. Análisis de ensayo de microscopia SEM

En esta sección se encuentra la Tabla XX, con una recopilación de las mediciones registradas mediante el ensayo SEM a las membranas poliméricas.

TABLA XX

REGISTRO DE DIÁMETROS OBTENIDOS

Muestra	Mediciones (nm)	Diámetro máximo (nm)	Diámetro mínimo (nm)	Diámetro promedio (nm)	Desviación estándar (s)
M2.1	1768,72 1823,15 988,74 1594,3 988,74 2381,21	2381,21	988,74	1590,81	535,8
M2.2	1711,52 1210,23 1530,83 1530,83 1210,23 1082,46	1711,52	1082,46	1379,35	245,6
M2.4	1565,32 1106,85 1750,08 1237,49 1410,96 1472,27	1750,08	1106,85	1423,83	229,8

TABLA XX

REGISTRO DE DIÁMETROS OBTENIDOS (continuación)

M2.5	1401,24 1597,66 1329,33 1329,33 1253,3 1401,24	1597,66	1253,3	1385,35	117,7
M2.6	1016,02 1135,94 1135,94 1135,94 1016,02 1016,02	1135,94	1016,02	1075,98	65,6
M2.7	1495,57 1495,57 1337,68 1891,77 2006,52 1337,68	2006,52	1337,68	1594,13	286,2
M3.3	1559,89 1778,55 1395,21 1395,21 1559,89 1479,84	1778,55	1395,21	1528	143,1
M3.5	1589,83 1870,75 1394,37 1971,94 1589,83 1322,82	1971,94	1322,82	1623,2	256
M3.6	1356,54 1278,96 1429,92 1429,92 1278,86 1356,54	1429,92	1278,86	1355,1	67,54

La (Fig. 20), muestra una distribución de los diámetros promedios registrados durante el análisis del ensayo microscópico de las membranas poliméricas realizadas a base de PLA.

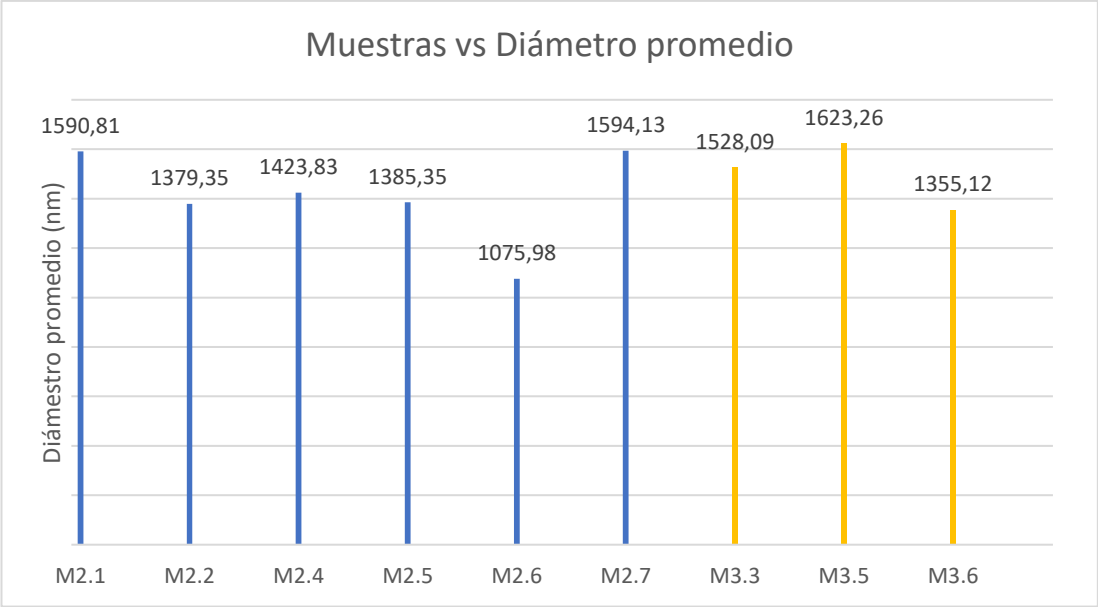


Fig. 20. Diagrama de los diámetros promedios registrados

En la gráfica se mira la comparación de las muestras M2 y M3, donde los datos de las soluciones M3 muestran diámetros promedios más altos. El aumento en las mediciones sugiere mayor viscosidad del fluido. Dichas variaciones son asociadas a una mayor concentración de polímero o a la variación de las condiciones operativas.

3.6. Discusión de resultados

Mediante el ensayo de microscopia SEM se pudo identificar los diámetros de las fibras de PLA obtenidas mediante electrohilado. Para lo cual se trabajó con la variación de parámetros operativos. En este proceso se observó que las muestras del grupo M1, al contener una cantidad mínima de polímero, generaron una mezcla demasiado ligera y con una viscosidad muy baja. Por ende, durante el proceso de hilado la solución formo un chorro continuo, depositándose directamente sobre el colector, lo que impidió la formación de fibras y la obtención de membranas aptas para una caracterización.

Los datos referentes al grupo M2 evidencian que, aunque visualmente las membranas son aceptables por la formación de fibras durante el proceso de electrohilado. En la

microscopía se contempla material acumulado en ciertas zonas y mayor presencia de grumos en la muestra realizada. Ya que las membranas producidas son más delgadas a comparación de otras soluciones resultando beneficiosas en aplicaciones donde se requiere alta permeabilidad, como soportes celulares o interfaces selectivas en el ámbito biomédico relacionando de manera directa el espesor con la porosidad [50]. En cambio, las membranas con espesores mayores pueden ser utilizadas en filtros de aire de alto desempeño, ya que disminuyen la caída de presión con lo que mantienen una alta eficiencia de captura de partículas finas[51].

Las fibras con diámetros finos son de gran importancia en aplicaciones de filtración de aire y líquidos, ya que, poseen poros pequeños, pero de gran área específica permitiendo una eficiencia del 99% en el proceso de captación de material particulado[19]. Por el contrario, fibras con diámetros más gruesos son empleados como andamios en la ingeniería de tejidos, también como materiales de refuerzo o blindaje, y soportes para la liberación de fármacos. Estos diámetros al tener una menor área específica, permiten un mejor manejo y estabilidad dimensional con una mayor sección resistente [52].

En el análisis microscópico SEM correspondiente al grupo M3, se observó un menor número de muestras aptas para revisión, situación que se relaciona a la concentración y viscosidad elevada, Por lo cual, se agruparon tres muestras poliméricas detalladas en la Tabla XXI, determinando que los parámetros utilizados en la muestra 3.3, son los más acordes para realizar trabajos experimentales con PLA, debido a la mínima presencia de grumos, uniformidad y continuidad de las fibras en comparación a las otras muestras realizadas durante este trabajo.

TABLA XXI

MEJORES MUESTRAS POLIMÉRICAS

Muestra	**Voltaje (kV)**	**Distancia aguja-colector**	**Datos de solución polimérica**		**Diámetro de membrana (cm)**	**Diámetro promedio de fibra (µm)**
			Cantidad de PLA (g)	**Cantidad de solvente (ml)**		
M3.3	14	15.5	20	20	14.5	1528
M3.5	10	9.5	20	20	14	1623.2
M3.6	10	13.5	20	20	14	1355.1

3.7. Verificación de hipótesis

Los ensayos realizados confirmaron que ciertas combinaciones de parámetros, como una mayor concentración de polímero y voltajes altos suficientes para superar la tensión superficial del fluido, permiten la formación de fibras poliméricas estables. Donde las soluciones con concentraciones bajas no formaron el cono de Taylor, en cambio las muestras con concentraciones intermedias generaron membranas con menores diámetros al igual que su espesor, Por el contrario, las soluciones con concentraciones altas mostraron fibras más uniformes, diámetros adecuados y un mayor espesor de membrana, mostrando que el control de los parámetros influye de manera directa en la producción de fibras.

3.7.1. Hipótesis Nula (Ho)

Las variaciones de parámetros no tienen efectos relevantes en el diámetro de las fibras de PLA. Es decir que, las medias de los diámetros no varían considerablemente entre los niveles de cada parámetro.

3.7.2. Hipótesis alternativa (Ha)

Al controlar adecuadamente los parámetros operativos, como la concentración de la solución, el voltaje y la distancia de inyección. El proceso de electrohilado permitirá obtener fibras con diámetros que varíen significativamente.

3.7.3. Comprobación mediante ANOVA

El método ANOVA es ampliamente utilizado para comparar las medias de tres o más grupos y determinar la variación explicada por los parámetros operativos y la variación residual (error) [53].

Por lo tanto, se plantea la siguiente resolución:

Si $F_{calculado} < F_{crítico}$

No hay diferencia significativa se acepta Ho.

Si $F_{calculado} > F_{crítico}$

Existe diferencia significativa se rechaza Ho y se acepta Ha.

Por lo tanto, la matriz a ser verificada mediante el método ANOVA se detalla en la Tabla XXII.

TABLA XXII

MATRIZ DE VERIFICACIÓN

Muestra	Factor A Voltaje (kV)	Factor B Distancia aguja-colector	Diámetro promedio (nm)
M2.1	14	9.5	1590.81
M2.2	14	13.5	1397.35
M2.4	10	9.5	1423.83
M2.5	10	13.5	1385.35
M2.6	10	15.5	1075.98
M2.7	6	9.5	1594.13
M3.3	14	15.5	1528
M3.5	10	13.5	1623.2
M3.6	10	15.5	1355.1
Promedio general		$\bar{Y}$	1441.53

PROCEDIMIENTO

Suma de cuadrados total SST

$$SST = \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

$$SST = 232570.63$$

Suma de cuadrados por factor A (Voltaje)

Agrupamos por nivel de voltaje y calculamos la media por grupo.

$$6kV \rightarrow \bar{Y}_6 = 1594.13$$

$10kV \rightarrow \bar{Y}_{10}$

$$\bar{Y}_{10} = \frac{M2.4 + M2.5 + M2.6 + M3.6 + M3.6}{5} = 1372.69$$

$14kV \rightarrow \bar{Y}_{14}$

$$\bar{Y}_{14} = \frac{M2.1 + M2.2 + M3.3}{3} = 1505.39$$

$$SS_A = \sum n_i(\bar{Y}_{Ai} - \bar{Y})^2 \quad (8)$$

$$SS_A = n_i(\bar{Y}_6 - \bar{Y})^2 + n_i(\bar{Y}_{10} - \bar{Y})^2 + n_i(\bar{Y}_{14} - \bar{Y})^2$$

$$SS_A = 59213.13$$

Suma de cuadrados por factor B (Distancia aguja-colector)

Agrupamos por distancia y calculamos la media por grupo.

$9.5\ cm \rightarrow \bar{Y}_{9.5}$

$$\bar{Y}_{9.5} = \frac{M2.1 + M2.4 + M2.7}{3} = 1536.26$$

$13.5\ cm \rightarrow \bar{Y}_{13.5}$

$$\bar{Y}_{13.5} = \frac{M2.2 + M2.5 + M3.5}{3} = 1468.63$$

$15.5\ cm \rightarrow \bar{Y}_{15.5}$

$$\bar{Y}_{15.5} = \frac{M2.2 + M2.5 + M3.5}{3} = 1319.69$$

$$SS_B = \sum n_j(\bar{Y}_{B_j} - \bar{Y})^2 \quad (9)$$

$$SS_B = n_j(\bar{Y}_6 - \bar{Y})^2 + n_j(\bar{Y}_{10} - \bar{Y})^2 + n_j(\bar{Y}_{14} - \bar{Y})^2$$

$$SS_B = 73655.72$$

Suma de cuadrados residual

$$SS_E = SST - SS_A - SS_B \quad (10)$$

$$SS_E = 99701.78$$

Grados de libertad

Total: $Total: df_T = N - 1 = 9 - 1 = 8$

Voltaje: $df_A = A - 1 = 3 - 1 = 2$

Distancia: $df_B = B - 1 = 3 - 1 = 2$

Error (residual): $df_E = df_T - df_A - f_B = 4$

Cuadrados medios

$$MS_A = \frac{SS_A}{df_A} = 29606.57$$

$$MS_B = \frac{SS_B}{df_B} = 36827.86$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{df_E} = 24925.45$$

Estadístico para cada factor

$$F_A = \frac{MS_A}{MS_E} = 1.19$$

$$F_B = \frac{MS_B}{MS_E} = 1.48$$

Distribución F 0.05

En las columnas se encuentran los valores F que corresponden al área 0.05 a la derecha
En las columnas se encuentran los grados de libertad del numerador
En los renglones se encuentran los grados de libertad del denominador.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.0	243.9	245.9
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.43
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.70
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.86
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.62
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.94
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.51
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.22
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.01
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.85
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.72
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.62
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.53
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.46
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.40
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.35
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.31
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.27

Fig. 21. Tabla de Valores Críticos F (0.05) – Estadística [54]

Para $\alpha = 0.05, con\ df_1 = 2\ y\ df_E = 4$, el F critico calculado es:

$$F_{crítico}(0.005; 2,4) = 6.94$$

$$F_A = 1.19 < 6.94$$

$$F_B = 1.48 < 6.94$$

No se detectan diferencias significativas al 5% tanto para voltaje como distancia.

TABLA XXIII
RESULTADOS MÉTODO ANOVA

Fuente	SS	gl	MS	F	Decisión ($\alpha = 0.05$)
Voltaje (A)	59213.1	2	29606.57	1.19	No significativo
Distancia (B)	73655.7	2	36827.86	1.48	No significativo
Error	99701.78	4	24925.45		
Total	232570.6	8			

Por lo que: $F_A < F_{crítico}$

$F_B < F_{crítico}$

Mediante las condiciones evaluadas se evidencia que, los factores utilizados durante la experimentación no modifican considerablemente el diámetro de las fibras de PLA y con la ayuda del análisis estadístico ANOVA, se determinó que la variación de los parámetros como el voltaje, distancia y concentración no producen diferencias significativas del diámetro promedio de la fibra producida. Lo que sugiere que, en los rangos propuestos, el proceso de electrohilado sigue presentando estabilidad dimensional ya que los niveles definidos no generan variaciones suficientemente grandes las cuales puedan superar la variabilidad del proceso.

Este resultado respalda la Hipótesis nula (Ho), teniendo en cuenta que, esto no invalida la investigación solo implica que el rango experimental realizado no genera diferencias relevantes en las fibras producidas.

3.7.4. Método Taguchi

La verificación se complementará con el método Taguchi, el cual, mediante el análisis estadístico de los datos experimentales obtenidos recomienda los posibles parámetros óptimos para el proceso. Esta metodología ayudará a reducir el tiempo requerido en

nuevas pruebas experimentales, optimizando la repetibilidad del procedimiento en investigaciones basadas en PLA y cloroformo.

El método Taguchi utiliza matrices y la relación señal-ruido (S/N) como herramienta principal para identificar la configuración optima de parámetros, optimizando los parámetros que reducen la variabilidad del proceso y optimizan la respuesta deseada [55].

Se trabaja con tres factores presentes durante el proceso de electrohilado, con el criterio "mientras más pequeño, mejor"

Factor A: Hace referencia a las diferentes concentraciones utilizadas (M2, M3), donde los factores referentes a M1 se excluyen por que no existe formación de fibras.

Factor B: Hace referencia a los voltajes aplicados.

Factor C: Hace referencia a la distancia entre aguja-colector.

Por lo tanto, la matriz a ser verificada mediante el método Taguchi se detalla en la Tabla XXIV.

TABLA XXIV

MATRIZ PARA VERIFICACIÓN

Muestra	Factor A % de concentración de solución	Factor B Distancia aguja-colector (cm)	Factor C Voltaje (kV)	(μ) Diámetro promedio (nm)	(s) Desviación estándar
M2.1	M2	9.5	14	1590.81	535.8
M2.2		13.5	14	1397.35	245.6
M2.4		9.5	10	1423.83	229.8
M2.5		13.5	10	1385.35	117.7
M2.6		15.5	10	1075.98	65.6
M2.7		9.5	6	1594.13	286.2
M3.3	M3	15.5	14	1528	143.1
M3.5		13.5	10	1623.2	256
M3.6		15.5	10	1355.1	67.54

Cálculo de la señal/Ruido (S/N)

Aplicando la ecuación (3):

$$\frac{S}{N} = -10 * \log_{10}\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \quad (3)$$

La relación se basa en:

Si el S/N el valor negativo es alto, el proceso es inestable, hay mucha variación y por lo tanto la calidad es baja.

Si el S/N es se acerca más al 0 el proceso tiende a ser estable, de manera que se da un proceso estable

Se entiende como efectos de los factores A, B y C, a los resultados obtenidos mediante las variables independientes, donde los datos registrados se basan en el criterio seleccionado, para estos factores se utilizarán las siguientes formulas.

Resultados Señal ruido (S/N)

TABLA XXV

RESULTADOS SEÑAL / RUIDO

Muestra	Señal ruido (S/N) (dB)
M2.1	-64,42
M2.2	-62,91
M2.4	-63,16
M2.5	-62,86
M2.6	-60,65
M2.7	-64,17
M3.3	-63,71
M3.5	-64,30
M3.6	-62,65

Cálculo del Factor A

Aplicando la ecuación (4):

$$\mu_M = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \quad (4)$$

Resultados del Factor A

Se agrupa por solución

$$\mu_{M2} = \frac{M2.1 + M2.2 + 2.4 + M2.5 + M2.6 + M2.7}{6} = 1411.2\ nm$$

$$\mu_{M3} = \frac{M3.3 + 3.5 + 3.6}{3} = 1502.1\ nm$$

Mediante el análisis con el método elegido, se observa que las fibras referentes a las soluciones M2 generan menores diámetros que las M3. Sin embargo, las otras muestras son más uniformes y con menos defectos, por lo cual, un punto importante es la discusión y selección final de las muestras, tomando en cuenta su diámetro y calidad estructural.

Calculó del Factor B

Aplicando la ecuación (5):

$$\mu_B = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{5}$$

Resultados del Factor B

Se agrupa por voltaje

$B1 = 6$ kV

$$\mu_6 = \text{M2.7} = 1594.13\ \text{nm}$$

$B2 = 10\ kV$

$$\mu_{10} = \frac{M2.4 + M2.5 + M2.6 + M3.5 + M3.6}{5} = 1372.39\ nm$$

$B3 = 14\ kV$

$$\mu_{14} = \frac{M2.1 + M2.2 + M3.3}{3} = 1505.39$$

Según el análisis Taguchi el voltaje de 10kV es el más acorde para el proceso, puesto que en promedio produce fibras con menores diámetros a comparación de los otros voltajes. asociándolo como el nivel óptimo para la investigación.

Cálculo del Factor C

Aplicando la ecuación (6):

$$\mu_C = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{6}$$

Resultados del Factor C

Se agrupa por distancia de inyección

$C1 = 9.5$

$$\mu_{9.5} = \frac{M2.1 + M2.4 + M2.7}{3} = 1536.26\, nm$$

$C2 = 13.5$

$$\mu_{13.5} = \frac{M2.2 + M2.5 + M3.5}{3} = 1468.63\, nm$$

$C3 = 15.5$

$$\mu_{15.5} = \frac{M2.6 + M3.3 + M3.6}{3} = 1319.69\, nm$$

Se obtiene un resultado donde se observa que la distancia más larga durante el estudio favorece la obtención de diámetros menores, de tal manera que se vincula con la investigación donde un trayecto más largo permite un estiramiento más amplio y mejor evaporación del solvente antes de depositarse.

3.8. Recursos

TABLA XXVI

RECURSOS DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

RECURSOS			
Tipo de recurso	Recurso	Función	Valor
Materiales	Polímero	Material base	$80
	Equipo de almacenamiento	Almacenar la solución polimérica	$30
	Solvente	Diluir el polímero	$150
	Jeringa	Cuantificar el solvente	$15
	Ensayos	Analizar las muestras generadas	$350
TOTAL			$625

CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se realizaron pruebas preliminares de electrohilado con el fin de observar el comportamiento del PLA durante el proceso y definir las condiciones operativas. Mediante esta valoración se definieron los siguientes parámetros óptimos para la fase experimental: voltajes de 6,10 y 14 kV, distancia de inyección de 9.5, 13.5 y 15.5 cm, y concentraciones de 5, 10, y 20 g de PLA disueltos en 100 ml.
- Tras el proceso de electrohilado se determinó que las soluciones del grupo M1 que poseen una viscosidad baja no generan fibras, mientras que las pertenecientes a M2 muestran membranas con menor espesor y diámetros finos. Por otro lado, las soluciones M3 mostraron una menor cantidad de muestras a caracterizar, pero más robustas, con mayor uniformidad, continuidad y mínima presencia de defectos. Reflejando que la selección de parámetros operativos debe ser acorde a la finalidad que se le dará a la membrana producida.
- Mediante la aplicación del análisis SEM y FTIR se evaluó la estructura y morfología de las membranas electrohiladas. Donde el SEM evidenció que el hilado del grupo M3 presentan mayor uniformidad, continuidad y diámetros más estables con un promedio de fibra de 1502.1 nm. Por su parte, los espectros FTIR revelaron las bandas características de los materiales utilizados, tanto del PLA como del cloroformo y mostraron que estas señales de igual manera aparecen en las soluciones poliméricas realizadas.
- Se evidencia que solo una fracción de las membranas producidas mediante el proceso de electrohilado alcanzó las condiciones necesarias para continuar con su caracterización. Aunque varias muestras parecían adecuadas únicamente el 33% cumplió con los criterios de aprobación, mientras que el 67% de las muestras realizadas presentaron defectos significativos por lo cual fueron descartadas. Lo que mostró que el PLA es sensible a las variaciones de los parámetros operativos afectando directamente a la calidad morfológica del material obtenido.

- Los resultados del ensayo de viscosidad confirman que, el cloroformo puro presenta una viscosidad despreciable actuando solo como medio de disolución sin aportar viscosidad. Siendo el PLA el único elemento que define la densidad y consistencia de la solución, por lo tanto, se entiende que a mayor cantidad de polímero mayor viscosidad en la solución.
- Se demuestran que, con voltajes entre 10 y 14 kV y con distancias de inyección entre 13.5 a 15.5 cm el chorro electroestático permanece estable durante el proceso, permitiendo la formación de fibras continúas, más uniformes y reproducibles. Por el contrario, parámetros como voltaje de 6kv o distancias cortas mostraron inestabilidad durante el proceso.

4.2. Recomendaciones

- Mediante nuevas variaciones en los porcentajes peso/volumen de las concentraciones y la aplicación de otros solventes compatibles, se extendería la metodología empleada, lo que contribuirá en el diseño de membranas con propiedades más ajustadas a requerimientos aplicativos más específicos.
- El uso de una bomba de infusión permitirá controlar de manera precisa el flujo de la solución polimérica durante el proceso de electrohilado, con lo que se mantendrá un suministro constante y estable.
- La incorporación de ensayos como pruebas de permeabilidad, resistencia mecánica o eficiencia en procesos de filtración, permitirá relacionar las condiciones operativas y los resultados obtenidos con el desempeño de las membranas en aplicaciones futuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] H. M. Gonzales-Molfino *et al.*, "Electrospinning: avances y aplicaciones en el campo de la biomedicina," *Rev. Fac. Med. Hum. Octubre*, vol. 20, no. 4, pp. 706–713, 2020, doi: 10.25176/RFMH.v20i4.3004.

[2] B. I. Persona Báez, C. A. Martínez Pérez, and E. S. Zuñiga Aguilar, "Fabricación de fibras poliméricas a base de PLA obtenidas mediante electrohilado," *CULCyT: Cultura Científica y Tecnológica, ISSN-e 2007-0411, Vol. 17, Nº. 1, 2020*, vol. 17, no. 1, p. 1, 2020, doi: 10.20983/culcyt.2020.1.4.1.

[3] M. F. De Riccardis, "Electrospun Nanofibrous Membranes for Air Filtration: A Critical Review," *Compounds 2023, Vol. 3, Pages 390-410*, vol. 3, no. 3, pp. 390–410, Jul. 2023, doi: 10.3390/COMPOUNDS3030030.

[4] F. Han Lyn, M. R. Ismail-Fitry, M. A. Noranizan, T. B. Tan, and Z. A. Nur Hanani, "Recent advances in extruded polylactic acid-based composites for food packaging: A review," *Int J Biol Macromol*, vol. 266, p. 131340, May 2024, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2024.131340.

[5] J. Chen, R. Tan, J. Ren, M. Huang, L. Wang, and Q. Zhang, "Polylactic acid (PLA) composites reinforced by end-capped ZnO quantum dots for enhanced mechanical, thermal, and degradation properties," *Polymer (Guildf)*, vol. 337, p. 129007, Oct. 2025, doi: 10.1016/J.POLYMER.2025.129007.

[6] I. R. Campozano Mendoza and M. A. Riera, "Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones // Polylactic acid: a review of production methods and their applications," *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, vol. 16, no. 1, pp. 42–53, Jul. 2022, doi: 10.5281/ZENODO.6908007.

[7] B. Wang, J. Yao, H. Wang, and M. Wang, "Construction of a ternary system: a strategy for the rapid formation of porous poly(lactic acid) fibers," *RSC Adv*, vol. 12, no. 11, pp. 6476–6483, Feb. 2022, doi: 10.1039/D2RA00018K.

[8] R. Casasola, N. L. Thomas, A. Trybala, and S. Georgiadou, "Electrospun poly lactic acid (PLA) fibres: Effect of different solvent systems on fibre morphology and diameter," *Polymer (Guildf)*, vol. 55, no. 18, pp. 4728–4737, Sep. 2014, doi: 10.1016/J.POLYMER.2014.06.032.

[9] R. Scaffaro and M. C. Citarrella, "Nanofibrous Polymeric Membranes for Air Filtration Application: A Review of Progress after the COVID-19 Pandemic," *Macromol Mater Eng*, vol. 308, no. 9, pp. 01–18, Sep. 2023, doi: 10.1002/MAME.202300072.

[10] K. Ghosal *et al.*, “Electrospinning over Solvent Casting: Tuning of Mechanical Properties of Membranes,” *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, Dec. 2018, doi: 10.1038/S41598-018-23378-3;TECHMETA=128,145;SUBJMETA=172,4081,639,704,925;KWRD=ENVIRONMENTAL+IMPACT,NANOSCIENCE+AND+TECHNOLOGY.

[11] A. A. Conte, K. Sun, X. Hu, and V. Z. Beachley, “Effects of Fiber Density and Strain Rate on the Mechanical Properties of Electrospun Polycaprolactone Nanofiber Mats,” *Front Chem*, vol. 8, p. 545676, Jul. 2020, doi: 10.3389/FCHEM.2020.00610/BIBTEX.

[12] M. Jalalah *et al.*, “Electrospun Nanofiber/Textile Supported Composite Membranes with Improved Mechanical Performance for Biomedical Applications,” *Membranes 2022, Vol. 12, Page 1158*, vol. 12, no. 11, p. 1158, Nov. 2022, doi: 10.3390/MEMBRANES12111158.

[13] M. Eslamian, M. Khorrami, N. Yi, S. Majd, and M. R. Abidian, “Electrospinning of highly aligned fibers for drug delivery applications,” *J Mater Chem B*, vol. 7, no. 2, pp. 224–232, Jan. 2019, doi: 10.1039/C8TB01258J.

[14] I. Toscano, D. A. Morales Bravo, M. De-La-Torre, B. Acevedo Juárez, G. Alberto, and G. Mireles, “Análisis automático de micrografías SEM mediante aprendizaje profundo,” *Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información*, vol. 49, no. 1, pp. 100–114, Jan. 2023, doi: 10.17013/risti.49.100-114.

[15] A. Rezaei, E. Katoueizadeh, and S. M. Zebarjad, “Investigating of the influence of zinc oxide nanoparticles morphology on the properties of electrospun polyvinyl alcohol/chitosan (PVA/CS) nanofibers,” *J Drug Deliv Sci Technol*, vol. 86, p. 104712, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.JDDST.2023.104712.

[16] C. C. Zambrano Sánchez, B. J. Carrillo Anchundia, and G. B. Latorre Castro, “Materiales Poliméricos y el impacto ambiental: Una revisión,” *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional, ISSN-e 2550-682X, Vol. 7, Nº. 6 (JUNIO 2022), 2022, pages 596-614*, vol. 7, no. 6, pp. 596–614, Jun. 2022, doi: 10.23857/pc.v7i6.4092.

[17] Pérez Fabián Iván Nicolás, “Reciclaje de Plásticos: Una Estrategia Clave para la Sostenibilidad Ambiental. Una Revisión de la Literatura,” *Ciencia Latina: Revista Multidisciplinar, ISSN-e 2707-2215, ISSN 2707-2207, Vol. 8, Nº. 6, 2024, pages 9514-9524*, vol. 8, no. 6, pp. 9514–9524, Dec. 2024, doi: 10.37811/cl_rcm.v8i6.15623.

[18] J. Zhang, G. Chen, G. S. Bhat, H. Azari, and H. Pen, “Electret characteristics of melt-blown polylactic acid fabrics for air filtration application,” *J Appl Polym Sci*, vol. 137, no. 4, p. 48309, Jan. 2020, doi: 10.1002/APP.48309.

[19] Y. Zhou, Y. Liu, M. Zhang, Z. Feng, D. G. Yu, and K. Wang, “Electrospun Nanofiber Membranes for Air Filtration: A Review,” *Nanomaterials 2022, Vol. 12, Page 1077*, vol. 12, no. 7, pp. 03–33, Mar. 2022, doi: 10.3390/NANO12071077.

[20] D. H. Reneker and I. Chun, “Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning,” *Nanotechnology*, vol. 7, no. 3, p. 216, Sep. 1996, doi: 10.1088/0957-4484/7/3/009.

[21] N. Bhardwaj and S. C. Kundu, “Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique,” *Biotechnol Adv*, vol. 28, no. 3, pp. 325–347, May 2010, doi: 10.1016/J.BIOTECHADV.2010.01.004.

[22] G. I. Taylor, “Disintegration of water drops in an electric field,” *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 280, no. 1382, pp. 383–397, Jul. 1964, doi: 10.1098/RSPA.1964.0151.

[23] L. M. Duque Sánchez, L. Rodríguez, and M. López, “Electrospinning : la era de las nanofibras,” *Revista Iberoamericana de Polímeros, ISSN 1988-4206, ISSN-e 0121-6651, Vol. 14, Nº. 1, 2013, pages 10-27*, vol. 14, no. 1, pp. 10–27, 2013, Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4115102&info=resumen&idioma=SPA

[24] G. Duan and A. Greiner, “Air-Blowing-Assisted Coaxial Electrospinning toward High Productivity of Core/Sheath and Hollow Fibers,” *Macromol Mater Eng*, vol. 304, no. 5, p. 1800669, May 2019, doi: 10.1002/MAME.201800669;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER.

[25] Z. Liu, D. D. Sun, P. Guo, and J. O. Leckie, “An Efficient Bicomponent TiO2/SnO2 Nanofiber Photocatalyst Fabricated by Electrospinning with a Side-by-Side Dual Spinneret Method,” *Nano Lett*, vol. 7, no. 4, pp. 1081–1085, Apr. 2006, doi: 10.1021/NL061898E.

[26] S. M. Taghavi and R. G. Larson, “Modelo de fibra delgada regularizado para la formación de nanofibras mediante hilado centrífugo,” *Phys Rev E*, vol. 89, no. 2, p. 023011, Feb. 2014, doi: 10.1103/PhysRevE.89.023011.

[27] A. Kilic, S. Selcuk, A. Toptas, and A. Seyhan, “Nonelectro nanofiber spinning techniques,” *Electrospun and Nanofibrous Membranes: Principles and Applications*, pp. 267–293, Jan. 2023, doi: 10.1016/B978-0-12-823032-9.00001-5.

[28] T. Ning, Y. Zhou, H. Xu, S. Guo, K. Wang, and D. G. Yu, “Orodispersible Membranes from a Modified Coaxial Electrospinning for Fast Dissolution of Diclofenac Sodium,” *Membranes 2021, Vol. 11, Page 802*, vol. 11, no. 11, p. 802, Oct. 2021, doi: 10.3390/MEMBRANES11110802.

[29] D. Sharma, S. Kanchi, K. Bisetty, D. Sharma, S. Kanchi, and K. Bisetty, "Biogenic synthesis of nanoparticles: A review," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 12, no. 8, pp. 3576–3600, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.ARABJC.2015.11.002.

[30] Y. Xu, L. Zou, H. Lu, and T. Kang, "Effect of different solvent systems on PHBV/PEO electrospun fibers," *RSC Adv*, vol. 7, no. 7, pp. 4000–4010, Jan. 2017, doi: 10.1039/C6RA26783A.

[31] R. M. Nezarati, M. B. Eifert, and E. Cosgriff-Hernandez, "Effects of Humidity and Solution Viscosity on Electrospun Fiber Morphology," *https://home.liebertpub.com/tec*, vol. 19, no. 10, pp. 810–819, Apr. 2013, doi: 10.1089/TEN.TEC.2012.0671.

[32] J. M. Deitzel, J. Kleinmeyer, D. Harris, and N. C. Beck Tan, "The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles," *Polymer (Guildf)*, vol. 42, no. 1, pp. 261–272, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0032-3861(00)00250-0.

[33] D. Demir, N. Bolgen, and A. Vaseashta, "Electrospun Nanofibers for Biomedical, Sensing, and Energy Harvesting Functions," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 21, p. 4253, Nov. 2023, doi: 10.3390/POLYM15214253.

[34] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made," *Sci Adv*, vol. 3, no. 7, Jul. 2017, doi: 10.1126/SCIADV.1700782.

[35] R. Auras, L. T. Lim, S. E. M. Selke, and H. Tsuji, "POLY(LACTIC ACID): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications," *Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications*, pp. 1–499, Jan. 2010, doi: 10.1002/9780470649848;JOURNAL:JOURNAL:BOOKS;WGROUP:STRING:PUBLICATION.

[36] S. P. Nalawade, F. Picchioni, and L. P. B. M. Janssen, "Supercritical carbon dioxide as a green solvent for processing polymer melts: Processing aspects and applications," *Prog Polym Sci*, vol. 31, no. 1, pp. 19–43, Jan. 2006, doi: 10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2005.08.002.

[37] F. Nadeem, "Review On Polymer Processing Techniques Using Supercritical Carbon Dioxide (ScCO2)," *Pakistan Journal of Chemistry*, vol. 11, no. 1–4, p. 1, Jun. 2021, doi: 10.15228/2021.V11.I01-4.P01.

[38] A. Zielinska *et al.*, "Polymeric Nanoparticles: Production, Characterization, Toxicology and Ecotoxicology," *Molecules*, vol. 25, no. 16, p. 3731, Aug. 2020, doi: 10.3390/MOLECULES25163731.

[39] S. Hartig, S. Fries, and R. R. Balcarcel, "Reduced mitochondrial membrane potential and metabolism correspond to acute chloroform toxicity of in vitro

hepatocytes," *Journal of Applied Toxicology*, vol. 25, no. 4, pp. 310–317, Jul. 2005, doi: 10.1002/JAT.1067.

[40] K. X. Ruiz Moyolome, "Caracterización de las nanofibras de polisiloxano y nanopartículas de plata obtenidas por electrohilado vertical para la fabricación de membranas," Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2025. Accessed: Sep. 28, 2025. [Online]. Available: https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/43344

[41] O. Campana and Guerrero Víctor Hugo., "Caracterización Mecánica y Térmica de Ácido Poliláctico (PLA) Reforzado con Polvo de Bambú (PB)," *Revista Politécnica*, vol. 42, no. 1, pp. 17–24, Oct. 2018, Accessed: Sep. 28, 2025. [Online]. Available: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1390-01292018000400017&lng=es&nrm=i

[42] D. I. Antonio Chuquín Vasco, N. Santiago Chuquín Vasco III, B. I. David Rosario Rosero, and J. I. Pablo Chuquín Vasco, "Predicción de la concentración de cloroformo en el proceso de destilación de una mezcla metanol-cloroformo mediante ARN," *Dominio de las Ciencias*, vol. 8, no. 3, pp. 408–428, Jul. 2022, doi: 10.23857/dc.v8i3.2817.

[43] K. C. Tobar Majin and C. E. Proaño Pérez, "Diseño y construcción de una máquina para reciclar filamento de impresora 3D a partir de desechos de plástico PLA," Universidad Tecnica de Ambato, Ambato, 2025. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: https://repositorio.uta.edu.ec/bitstreams/c5efa5b8-c86c-47fa-b5fa-b627c2ae4b7a/download

[44] Y. Perez Padilla, C. Carrera Figueiras, and M. L. Alonzo Balam, "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS POLIMÉRICAS BASADAS EN PDMS-PEGsi-C y PDMS-APTES | Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán," *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.*, vol. 26, no. 1, pp. 77–90, May 2022, Accessed: Oct. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/231

[45] L. P. Terrazas Bandala, N. I. Cruz Ochoa, O. Solís Canto, L. A. Manjarrez Nevárez, and M. de L. Ballinas Casarrubias, "CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA PARA TRATAMIENTO DE AGUA POR TÉCNICAS DE MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA," *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 35, no. Special Issue 3, pp. 9–18, Dec. 2019, doi: 10.20937/RICA.2019.35.ESP03.02.

[46] manualslib, “NAHITA 810/1 MANUAL DEL USUARIO Descargar en PDF | ManualsLib.” Accessed: Nov. 30, 2025. [Online]. Available: https://www.manualslib.es/manual/112261/Nahita-810-1.html?page=1#manual

[47] E. Meaurio, N. López-Rodríguez, and J. R. Sarasua, “Infrared Spectrum of Poly(l-lactide): Application to Crystallinity Studies,” *Macromolecules*, vol. 39, no. 26, pp. 9291–9301, Dec. 2006, doi: 10.1021/MA061890R.

[48] J. P. Mofokeng, A. S. Luyt, T. Tábi, and J. Kovács, “Comparison of injection moulded, natural fibre-reinforced composites with PP and PLA as matrices,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 25, no. 8, pp. 927–948, Dec. 2012, doi: 10.1177/0892705711423291.

[49] J. Nishida, S. Shigeto, S. Yabumoto, and H. O. Hamaguchi, “Anharmonic coupling of the CH-stretch and CH-bend vibrations of chloroform as studied by near-infrared electroabsorption spectroscopy,” *Journal of Chemical Physics*, vol. 137, no. 23, pp. 1–9, Dec. 2012, doi: 10.1063/1.4770264.

[50] M. Souibgui *et al.*, “Ultrathin electrospun nanofibrous membranes based on poly(γ-benzyl-L-glutamate),” *Journal of Chemical Physics*, vol. 161, no. 23, pp. 1–13, Dec. 2024, doi: 10.1063/5.0238633/3326568.

[51] C. R. Reshmi, S. Nandakumar, S. V. Nair, and D. Menon, “Engineering nano-thin electrospun coatings for air filters with high filtration and breathability by nanofiber charge control,” *Mater Lett*, vol. 373, pp. 1–4, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.MATLET.2024.137043.

[52] A. A. Conte, K. Sun, X. Hu, and V. Z. Beachley, “Effects of Fiber Density and Strain Rate on the Mechanical Properties of Electrospun Polycaprolactone Nanofiber Mats,” *Front Chem*, vol. 8, p. 610, Jul. 2020, doi: 10.3389/FCHEM.2020.00610.

[53] H.-Y. Kim, “Analysis of variance (ANOVA) comparing means of more than two groups,” *Restor Dent Endod*, vol. 39, no. 1, pp. 74–77, 2014, doi: 10.5395/RDE.2014.39.1.74.

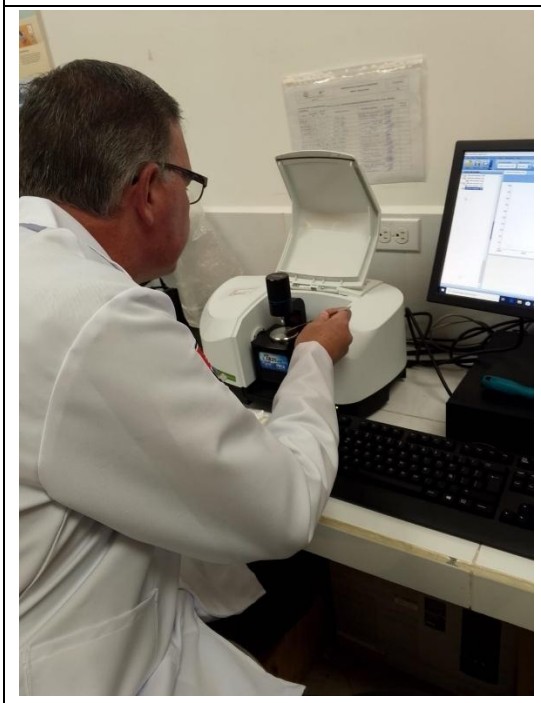
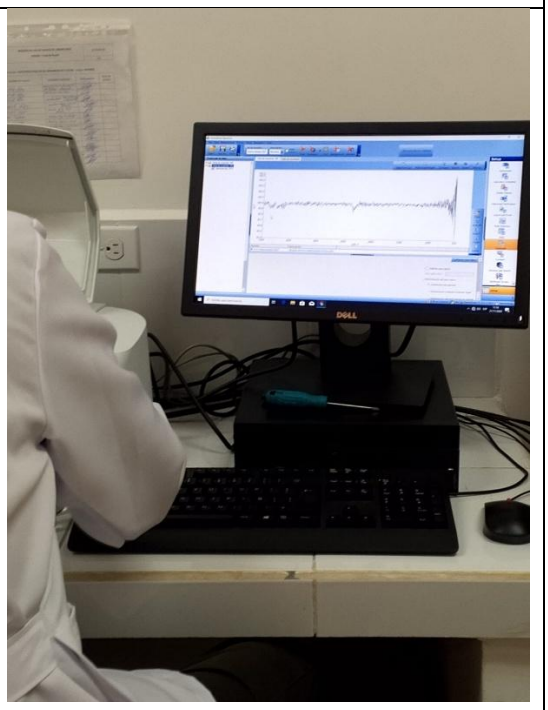
[54] Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, “Distribución F 0.05.” Accessed: Dec. 04, 2025. [Online]. Available: https://uaaan.mx/~jmelbos/tablas/distf.pdf

[55] Z. Mohamad, F. Fardoun, and F. Meftah, “A review on energy piles design, evaluation, and optimization,” *J Clean Prod*, vol. 292, pp. 1–20, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125802.

ANEXOS

Anexo 1. Fotografías descriptivas del Trabajo experimental.

<table>
<tr><td>Fotografía 1: Disolución mediante el uso de un agitador magnético.</td><td>Fotografía 2: Etiquetado de muestra.</td></tr>
<tr><td></td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fotografía 3: Selección de husillo y configuración de equipo.</td><td>Fotografía 4: Selección de recipiente respecto al volumen del fluido.</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

Fotografía 5: Ensayo FTIR	Fotografía 6: Espectro FTIR.
	

Anexo 2. Ficha técnica del ensayo de viscosidad.

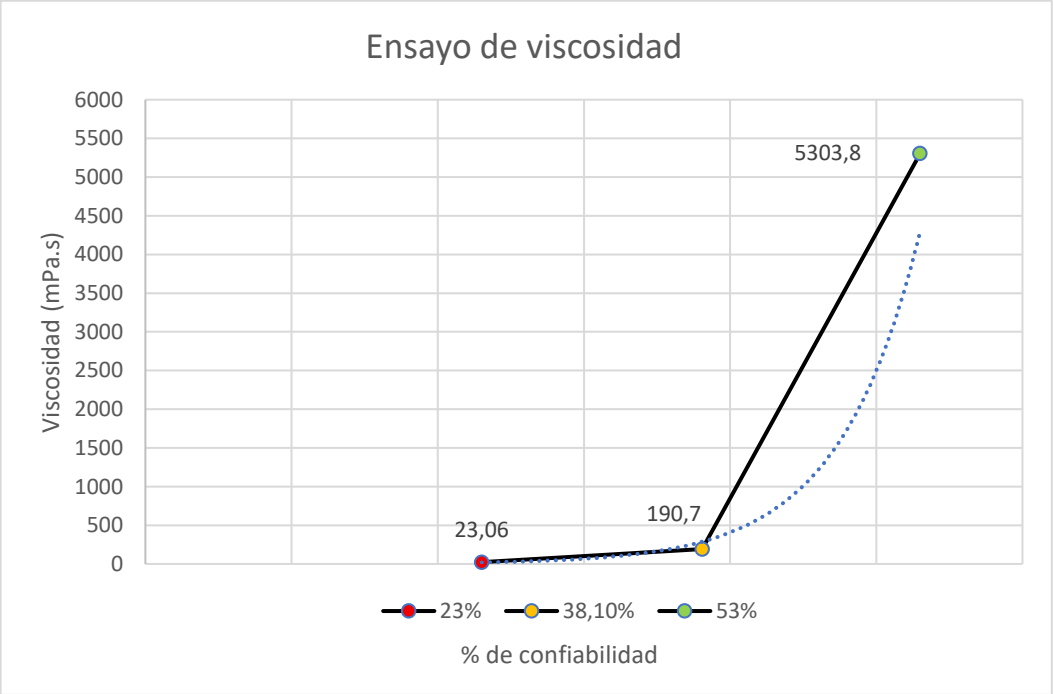
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica del ensayo de viscosidad	
Prueba 1	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	17/09/2025
Equipo utilizado	Viscosímetro
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Química, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros de ensayo	
Materiales	Soluciones Poliméricas
No. Husillo	1 – 2 - 3
Velocidad	12 – 60 RPM
Resultados	

Prueba	**Muestra**	**Velocidad (RPM)**	**Viscosidad (mPa.s)**	**Viscosidad Promedio**	**% de confiabilidad**
1	M1	60	23.06	23.06	23
2			23.09		
3			23.03		
4	M2	60	190.9	190.7	38.1
5			190.5		
6			190.6		
7	M3	12	5301.9	5303.8	53
8			5308.3		
9			5301.2		

Desviación estándar	2599.48	3001.6	15

La viscosidad del grupo M1 no se acepta, debido a que no se encuentra dentro del rango recomendado.



Observaciones

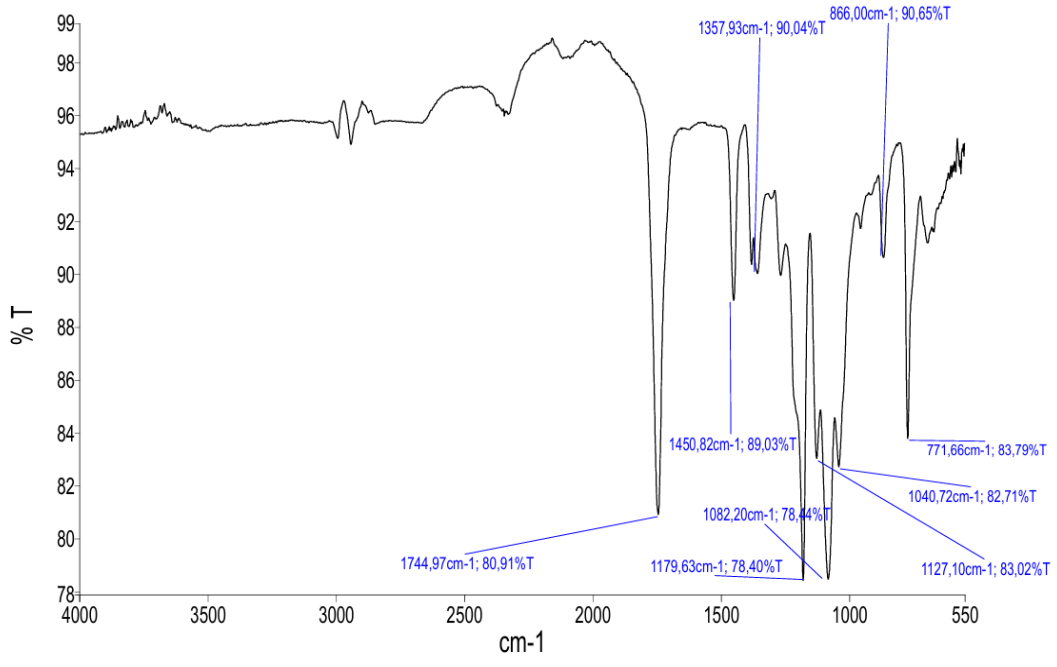
- Se comprobó que la muestra M1 no cumplía con el porcentaje mínimo de fiabilidad establecido por el fabricante; por lo tanto, su medición no se considera válida para el análisis comparativo.
- El gráfico muestra una línea de tendencia ascendente tanto para la viscosidad como para el porcentaje de fiabilidad a medida que aumentan las concentraciones p/v de las soluciones de polímeros. Esto indica que las soluciones con un mayor contenido de PLA son más densas y estables, lo que da lugar a mediciones más consistentes por parte del equipo.

Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 3. Ficha técnica FTIR P1

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo FTIR	
Prueba 1	
Fecha de ejecución	24/09/2025
Realizado por	Diego Guanina
Equipo utilizado	Spectrum Two - PerkinElmer
Técnico encargado	Dr. Orestes López
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Investigación UODIDE
Parámetros del ensayo	
Material	PLA
Resultados	



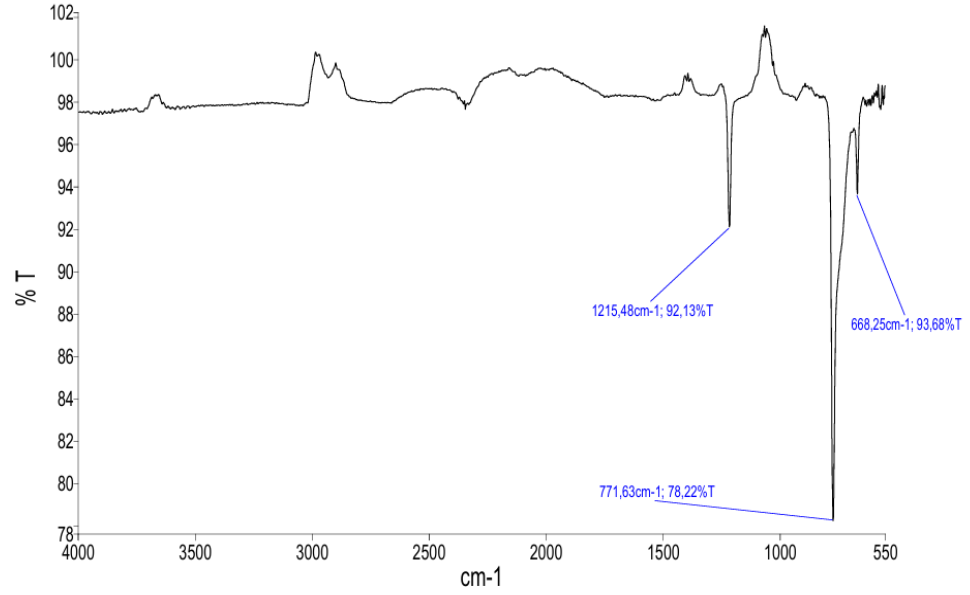
Observaciones

• El pico a 1744 cm^{-1} muestra las bandas características del PLA. Este pico se debe al estiramiento C=0 del grupo éster, lo que indica que la estructura química del polímero está intacta. • Se observa un conjunto de picos en la región de 1200-1000 cm^{-1}, correspondientes a las vibraciones C-O-C del enlace éster, que demuestran la presencia y la buena definición de la unidad repetitiva del PLA. • Las señales complementarias entre 1450-1350 cm^{-1} y por debajo de 900 cm^{-1} muestran deformaciones y vibraciones del polímero, completando así el perfil espectral del PLA y confirmando que no muestra signos de degradación.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 4. Ficha técnica FTIR P2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo FTIR	
Prueba 2	
Fecha de ejecución	24/09/2025
Realizado por	Diego Guanina
Equipo utilizado	Spectrum Two - PerkinElmer
Técnico encargado	Dr. Orestes López
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Investigación UODIDE
Parámetros del ensayo	
Material	Cloroformo
Resultados	



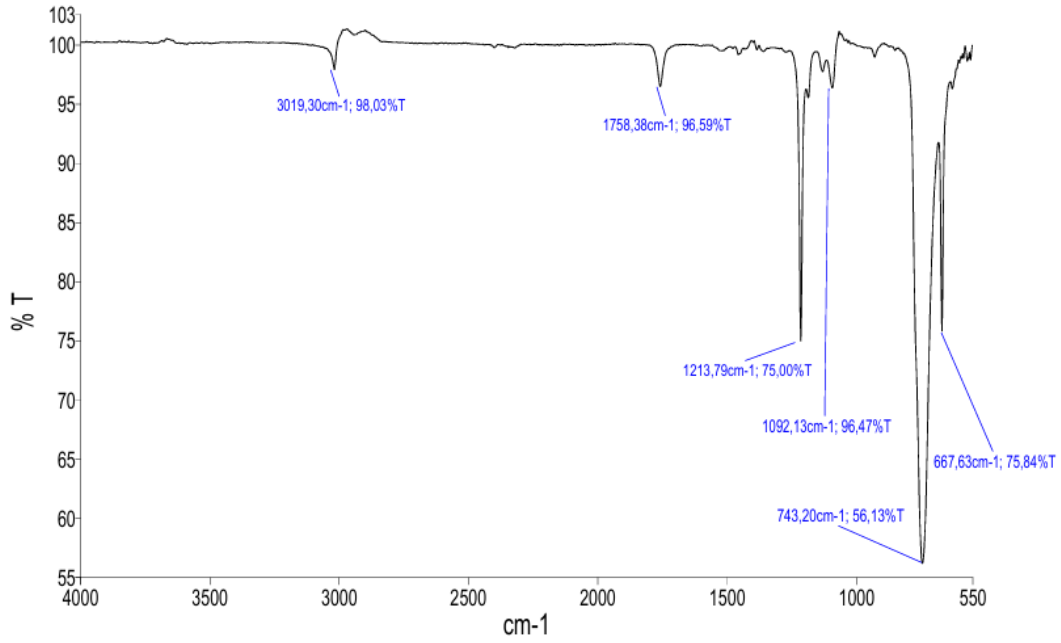
Observaciones

• Se puede observar las bandas típicas de los enlaces del cloroformo C-H y C-Cl, las que se encuentran señaladas en los picos 1215, 771 y 668 cm^{-1}, estas señales coinciden con la huella espectral conocida del solvente. • Las vibraciones que están asociadas con los enlaces C-Cl son intensas y bien definidas, lo que indica que el compuesto es químicamente estable. • No se observa picos adicionales que muestren alguna impureza, por lo que el ensayo FTIR demuestra que el cloroformo posee un grado adecuado de pureza para su uso en la preparación de soluciones poliméricas.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 5. Ficha técnica FTIR P3

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo FTIR			
Prueba 3			
Fecha de ejecución	24/09/2025		
Realizado por	Diego Guanina		
Equipo utilizado	Spectrum Two - PerkinElmer		
Técnico encargado	Dr. Orestes López		
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.		
Lugar de ensayo	Laboratorio de Investigación UODIDE		
Parámetros del ensayo			
Tipo de solución	M1	**Cantidad de polímero**	5 g
		Volumen de solvente	100 ml
Resultados			



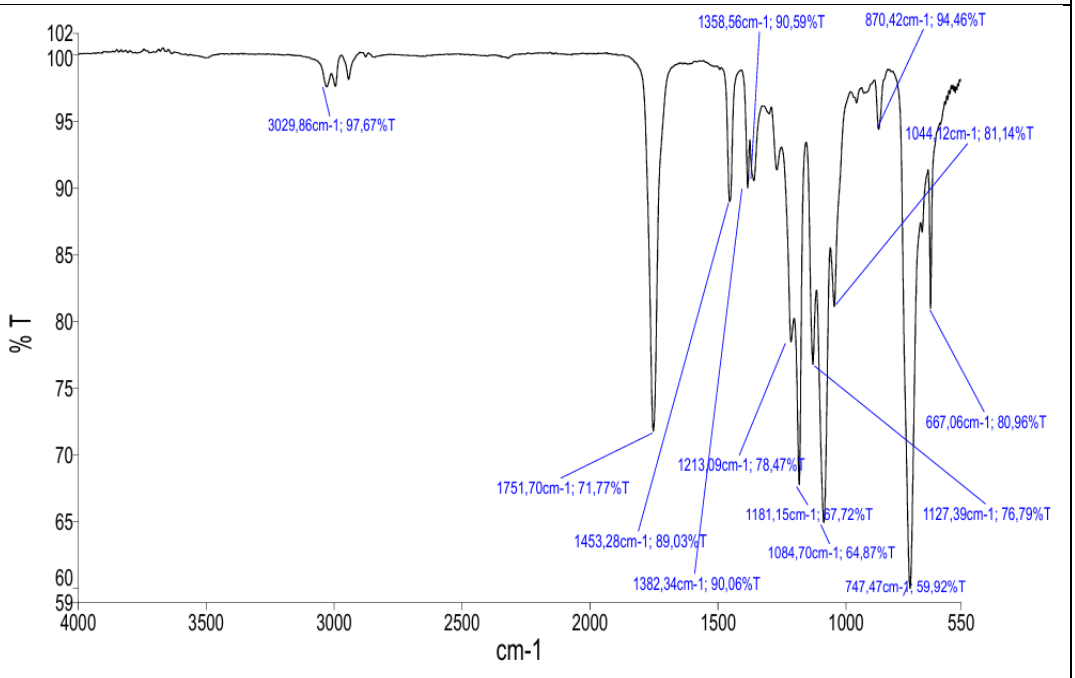
Observaciones

• La grafica referente al espectro FTIR reafirma que el polímero se encuentra químicamente integro, debido a que, las bandas de C=O y C-O-C están bien definidas, donde no se encuentra señales de degradación o modificaciones en la estructura. • Las bandas representativas del solvente 667 y 743 cm^{-1} muestran la presencia de solvente residual en la muestra, esto debido a que el reactivo es altamente volátil. • Se observa que, la combinación de las señales indica una solución estable y adecuadamente preparada, donde el solvente ha disuelvo el polímero sin generar reacciones indeseadas.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 6. Ficha técnica FTIR P4

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo FTIR			
Prueba 4			
Fecha de ejecución	24/09/2025		
Realizado por	Diego Guanina		
Equipo utilizado	Spectrum Two - PerkinElmer		
Técnico encargado	Dr. Orestes López		
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.		
Lugar de ensayo	Laboratorio de Investigación UODIDE		
Parámetros del ensayo			
Tipo de solución	M2	**Cantidad de polímero**	10 g
		Volumen de solvente	100 ml
Resultados			

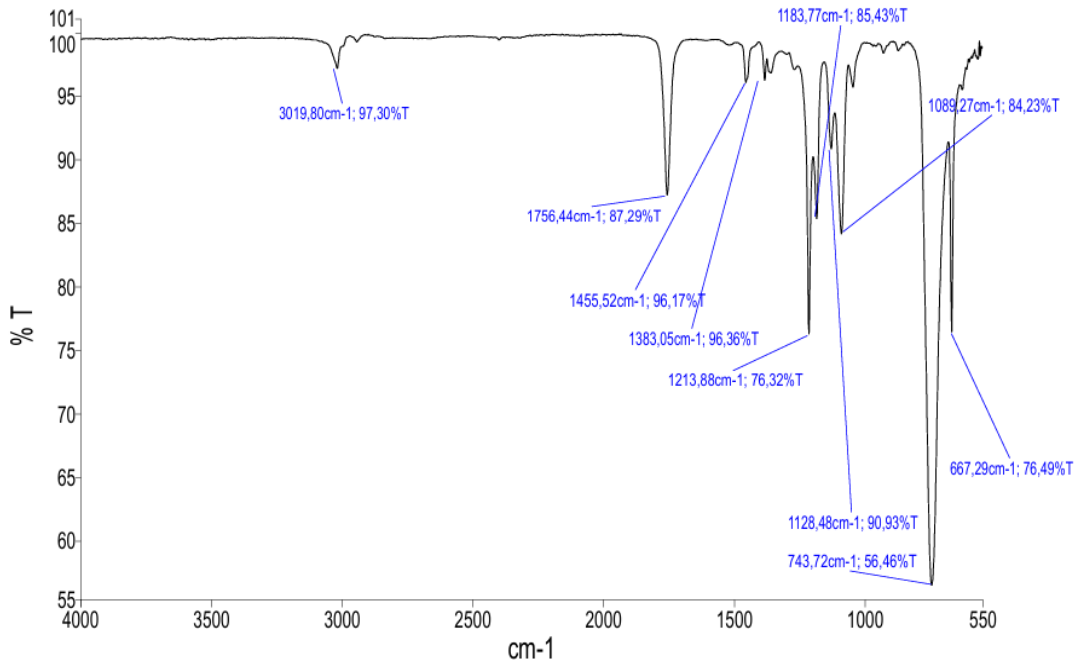


Observaciones	
• El espectro ratifica que el PLA mantiene su estructura química original, ya que se puede observar sus bandas características como es el estiramiento del grupo carbonitrilo y las señales propias del enlace éster. Indicando de esta manera que, el polímero no una degradación significativa durante la preparación de la solución. • Las bandas intensas asociadas al cloroformo (667 y 1127 cm^{-1}), muestran la existencia de solvente residual en la muestra, por lo que, evidencia que no hubo interacción química son el polímero, sino únicamente en proceso físico de disolución.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 7. Ficha técnica FTIR P5

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo FTIR			
Prueba 5			
Fecha de ejecución	24/09/2025		
Equipo utilizado	Spectrum Two - PerkinElmer		
Técnico encargado	Dr. Orestes López		
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.		
Lugar de ensayo	Laboratorio de Investigación UODIDE		
Parámetros del ensayo			
Tipo de solución	M3	**Cantidad de polímero**	20 g
		Volumen de solvente	100 ml
Resultados			

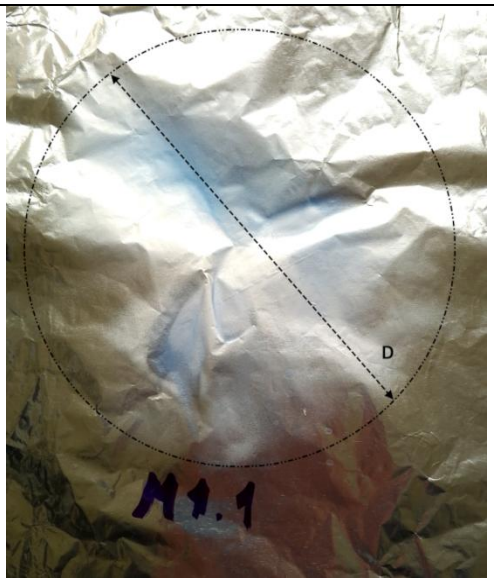


Observaciones

• El espectro indica la presencia predominante del polímero, la cual posee bandas intensas y bien definidas, estas muestran que la solución es estable y que se encuentra químicamente degradada. • En este caso las señales del cloroformo son visibles, pero no dominantes, evidenciando de esta manera que el solvente permanece atrapado, esto es normal debido a la relación p/v empleada. • El espectro general muestra que la solución polimérica es homogénea y preparada adecuadamente, donde las interacciones son físicas y no se generan reacciones químicas entre el polímero y el solvente.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 8. Ficha técnica electrohilado P1

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 1	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	13/10/2025
Codificación	M1.1
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	14
Distancia aguja-colector (cm)	9.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>15</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.004</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">No existe formación de fibras ya que la cantidad de polímero en la solución es baja.
Ya que no existe un hilado durante el proceso, la deposición de la solución es dispersa sobre el colector.
Visualmente no se considera membrana por el tipo de deposición en la que no existe un electrohilado, en cambio el chorro va formando una capa de solución llegando a plastificarse posteriormente.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 9. Ficha técnica electrohilado P2

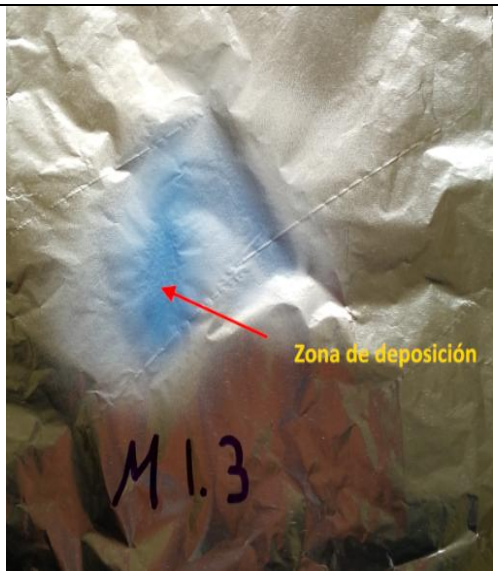
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 2	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	13/10/2025
Codificación	M1.2
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	14
Distancia aguja-colector (cm)	13.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>10</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.020</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">No existe formación de fibras en la prueba realizada.
Durante el proceso se da un chorro de la solución, el cual se concentra en los extremos.
Visualmente no se considera membrana ya que no existe formación de fibras que posteriormente se puedan analizar.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 10. Ficha técnica electrohilado P3

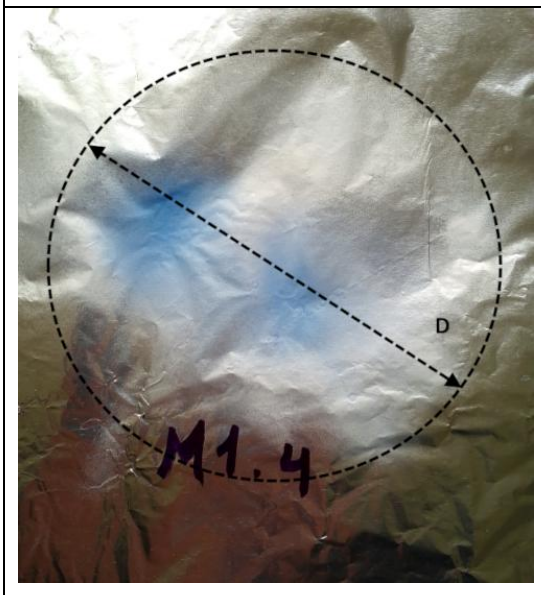
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 3	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	13/10/2025
Codificación	M1.3
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	14
Distancia aguja-colector (cm)	15.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>10</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.009</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td></td></tr>
<tr><td>No</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Debido a la concentración polimérica no existe formación de fibras
La deposición de la solución sigue de manera de chorro, concentrándose en ciertos lugares como se observa en la imagen.
Visualmente no se considera una membrana, debido a la inexistencia de fibras a ser analizadas.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 11. Ficha técnica electrohilado P4

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

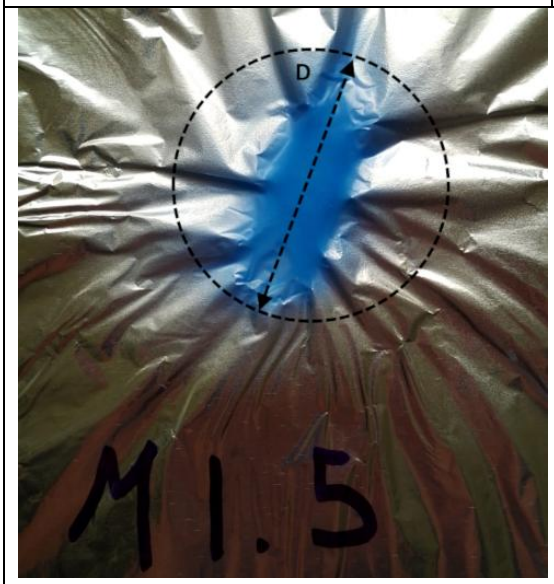
Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 4	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	14/10/2025
Codificación	M1.4
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	10
Distancia aguja-colector (cm)	9.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>13</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.006</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se observa una leve formación de fibras, aunque no las necesarias para formar una membrana.
El chorro de solución se concentra en ciertos lugares, mirando una mayor dispersión.
Visualmente no se considera una membrana, debido a que, en esta prueba existe una ligera formación de fibras, pero no son las suficientes o adecuadas para su análisis posterior.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 12. Ficha técnica electrohilado P5

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

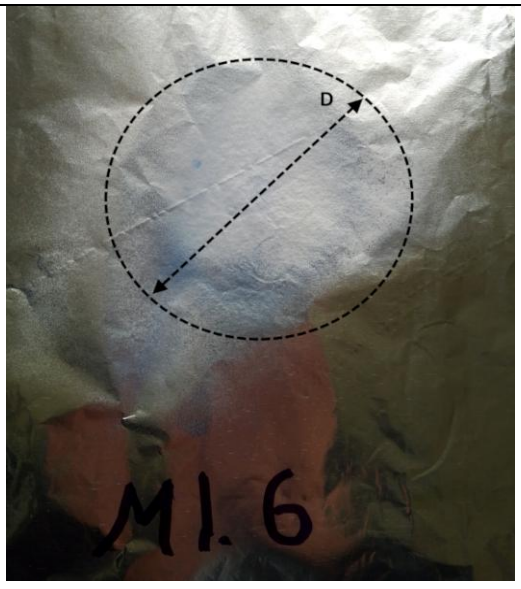
Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 5	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	14/10/2025
Codificación	M1.5
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	10
Distancia aguja-colector (cm)	13.5
Evidencia fotográfica	

Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>6</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.019</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se observa que durante el proceso de electrohilado, no existe formación de fibras.
la solución no vence la tensión superficial y debido a esto se crea un chorro que se concentra en un solo lugar.
Visualmente no se considera como membrana, ya que la solución fluye sin formar fibras.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 13. Ficha técnica electrohilado P6

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 6	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	14/10/2025
Codificación	M1.6
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	10
Distancia aguja-colector (cm)	15.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>8</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se percibe una leve formación de fibras durante el proceso de electrohilado.
Debido a que los factores utilizados no son los adecuados se observa que la solución fluye en manera de chorro, aunque levemente formando fibras.
Visualmente no se considera una membrana, ya que la solución crea una capa que se plastifica, la cual no se considera nanofibrosa.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 14. Ficha técnica electrohilado P7

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

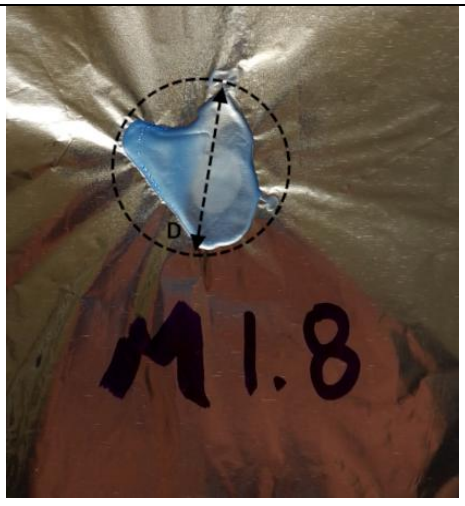
Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 7	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	15/10/2025
Codificación	M1.7
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	6
Distancia aguja-colector (cm)	9.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>6.5</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.011</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">En esta prueba de electrohilado no existe ninguna formación de fibra.
La solución polimérica se deposita en forma de chorro en el colector, observando una deposición discontinua.
Visualmente no se considera una membrana, ya que durante la prueba no se observa formación de fibras y la solución fluye en forma de chorro, haciendo que no pueda ser analizada posteriormente.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 15. Ficha técnica electrohilado P8

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 8	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	15/10/2025
Codificación	M1.8
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	6
Distancia aguja-colector (cm)	13.5
Evidencia fotográfica	

Anexo 1	**Anexo 2**
	

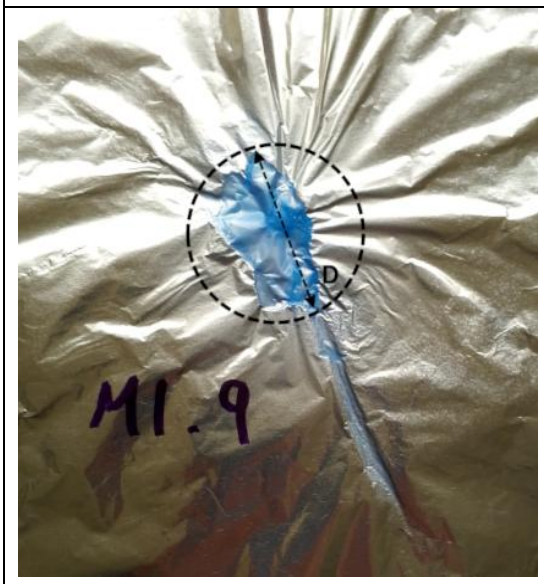
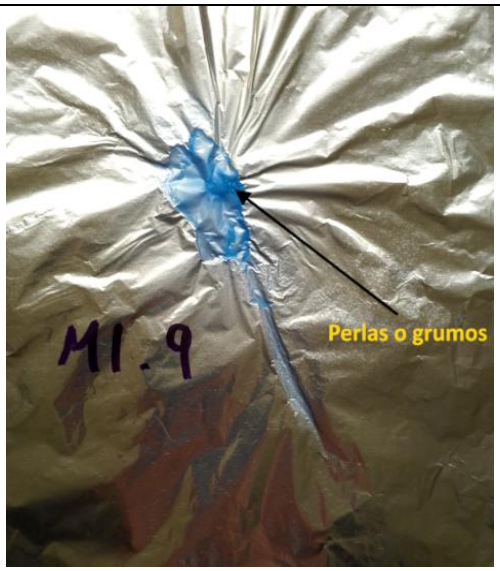
Resultados			
Diámetro efectivo (cm)	3.5	**Espesor (µm)**	0.007

No se evidencia la presencia de perlas o grumos	Si	**X**
	No	
Formación de membrana	Constante	
	No constante	**X**
Aspecto visual	Aceptado	
	Rechazado	**X**
Observaciones		
• Debido a los factores utilizados durante esta prueba, se mira que no se forman fibras poliméricas. • Se da un chorro de la solución hacia el colector, formando de esta manera una capa de polímero diluido que posteriormente se plastifica. • Visualmente no se lo considera una membra, puesto que la capa plástica no consta de nanofibras que se puedan analizar o hacer uso posteriormente.		
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.	

Anexo 16. Ficha técnica electrohilado P9

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 9	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	15/10/2025
Codificación	M1.9
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	6
Distancia aguja-colector (cm)	15.5
Evidencia fotográfica	

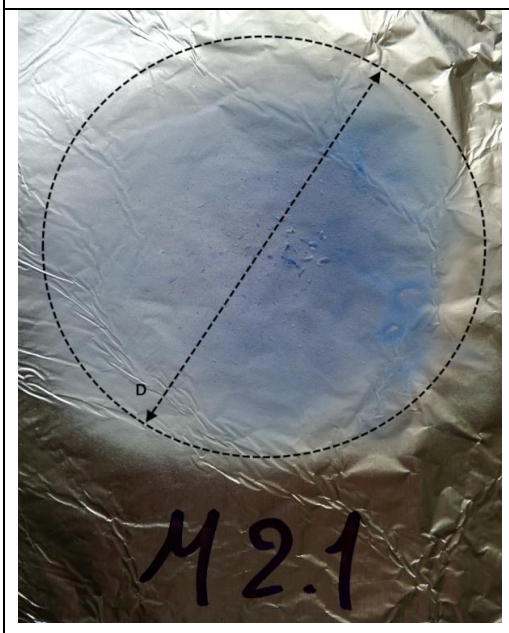
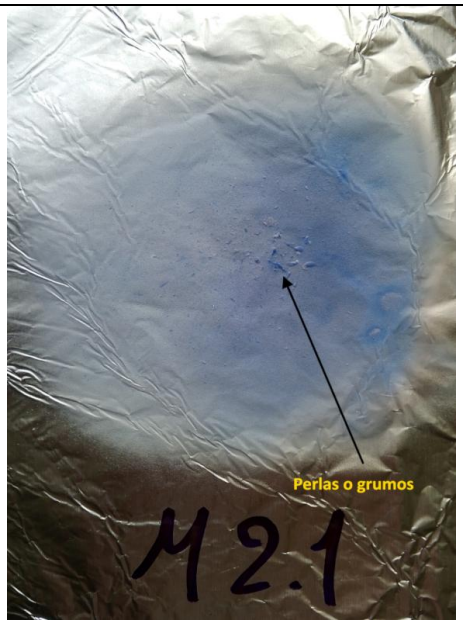
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>5</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.010</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se observa que los parámetros utilizados para esta prueba no son adecuados, ya que no se da formación de fibras.
La solución no vence la tensión superficial por lo que se da un chorro del fluido sobre el colector.
Visualmente no se considera una membrana, a causa de que, la capa plástica formada durante el proceso no llega a ser útil para ser analizada y darle un uso.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 17. Ficha técnica electrohilado P10

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 10	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	16/10/2025
Codificación	M2.1
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	14
Distancia aguja-colector (cm)	9.5
Evidencia fotográfica	

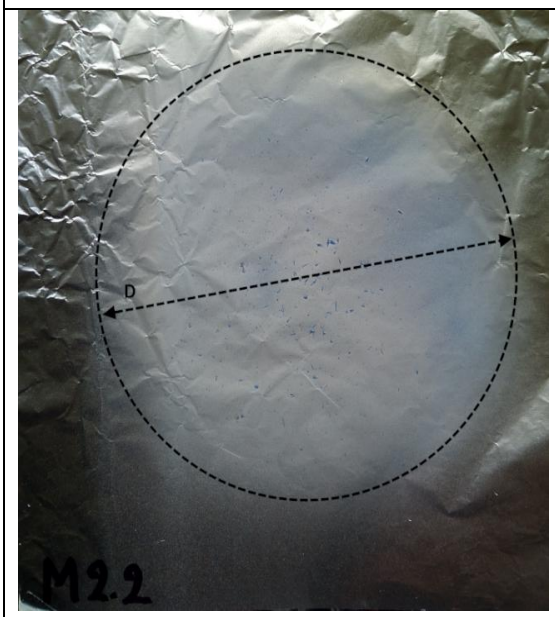
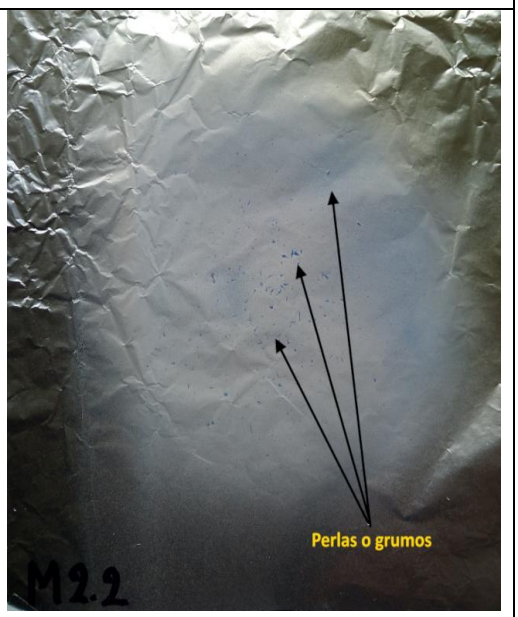
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>12</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.015</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No constante</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td>X</td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td></td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se observa que los factores utilizados durante esta prueba son más acordes para el proceso de electrohilado.
Existe formación de fibras que son depositadas de manera homogénea en el colector, aunque con ciertos defectos como perlas o grumos.
Visualmente se la aprueba como membrana polimérica a ser analizada, ya que se mira una mejora en la homogeneidad y estructura</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 18. Ficha técnica electrohilado P11

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 11	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	16/10/2025
Codificación	M2.2
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	14
Distancia aguja-colector (cm)	13.5
Evidencia fotográfica	

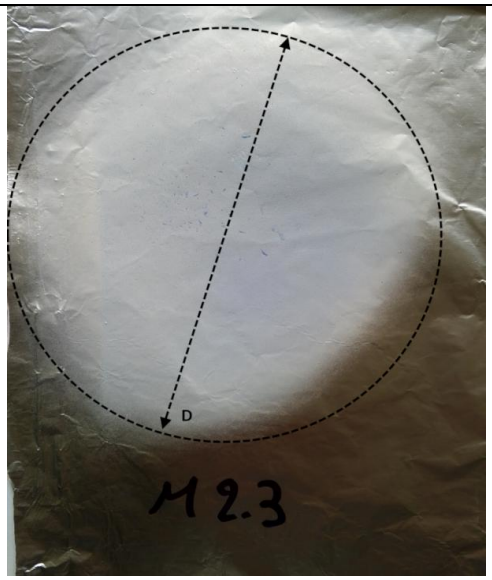
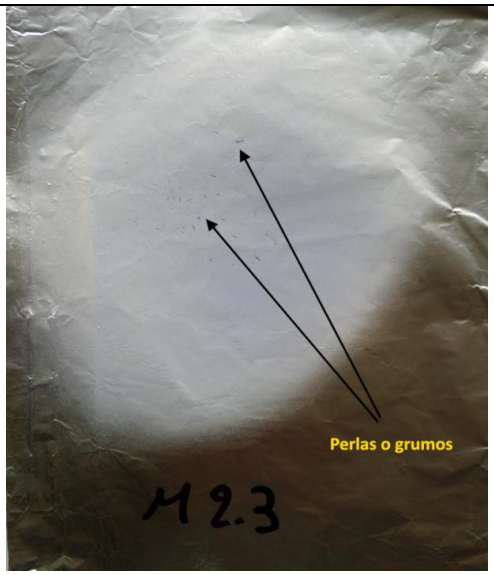
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>15.5</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.011</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No constante</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td>X</td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td></td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se puede observar que si existe formación de fibras poliméricas durante esta prueba de electrohilado. Y de igual manera la conformación de ciertos defectos estructurales como perlas o grumos.
La homogeneidad de la deposición de las fibras en el colector, se la puede considerar como adecuada, debido a que su diámetro es considerablemente capaz de ser utilizado en pruebas posteriores.
Visualmente se la considera como membrana, puesto que, se mira la formación de fibras poliméricas necesarias para el análisis posterior.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 19. Ficha técnica electrohilado P12

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 12	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	16/10/2025
Codificación	M2.3
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	14
Distancia aguja-colector (cm)	15.5
Evidencia fotográfica	

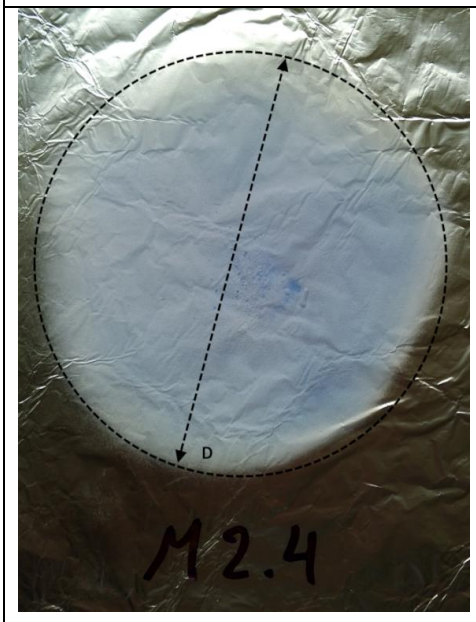
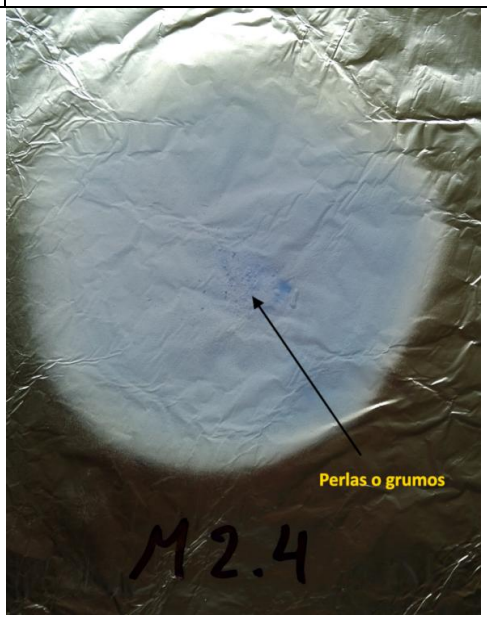
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>17.5</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.014</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">En esta prueba realizada se observa que, si se producen fibras poliméricas, aunque sigue existiendo la deposición perlas o grumos, pero en menor cantidad.
Esta membrana posee deficiencias en la su estructura, debido a que la deposición de las fibras no es continua el material se fracciona, por lo tanto, esta muestra se descarta para un análisis posterior.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 20. Ficha técnica electrohilado P13

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 13	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	17/10/2025
Codificación	M2.4
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	10
Distancia aguja-colector (cm)	9.5
Evidencia fotográfica	

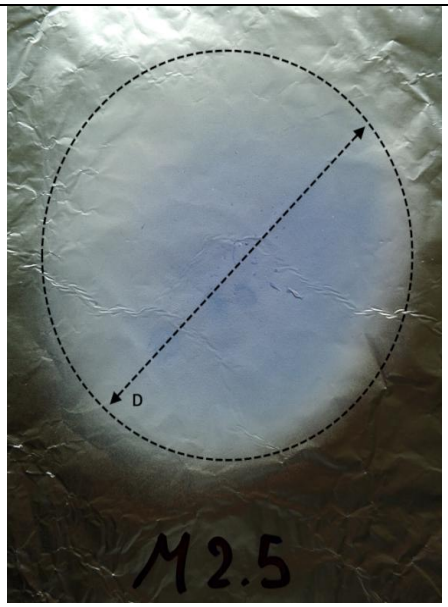
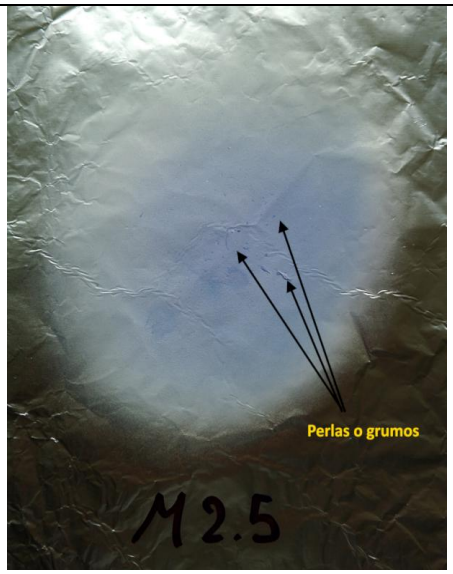
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>14</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.017</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No constante</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td>X</td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td></td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se mira que, durante el proceso de la producción de la membrana polimérica, se dan deposiciones de perlas o grumos, pero en una mínima cantidad que posiblemente no afectaría su aplicación.
Visualmente se acepta como membrana para el análisis siguiente, ya que posee un diámetro total considerable que puede ser utilizado con fines analíticos y utilizables.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 21. Ficha técnica electrohilado P14

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 14	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	17/10/2025
Codificación	M2.5
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	10
Distancia aguja-colector (cm)	13.5
Evidencia fotográfica	

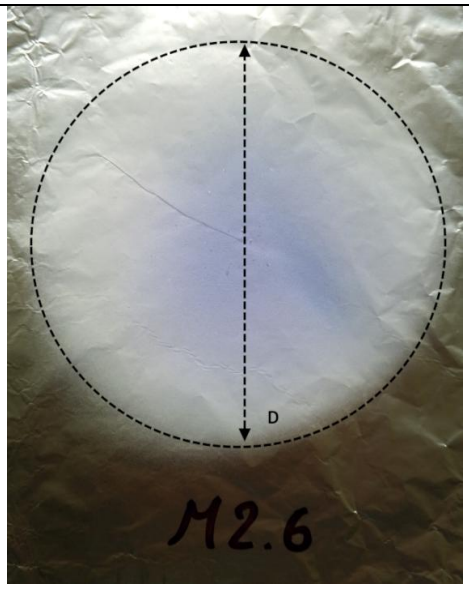
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>14.5</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.017</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No constante</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td>X</td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td></td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Visualmente esta membrana es aceptable, puesto que tiene un diámetro efectivo considerable para el análisis, aunque posee ciertos defectos estructurales como perlas o grumos, estos posiblemente no llegarían a afectar de manera considerable a su aplicabilidad.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 22. Ficha técnica electrohilado P15

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 15	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	17/10/2025
Codificación	M2.6
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	10
Distancia aguja-colector (cm)	15.5
Evidencia fotográfica	

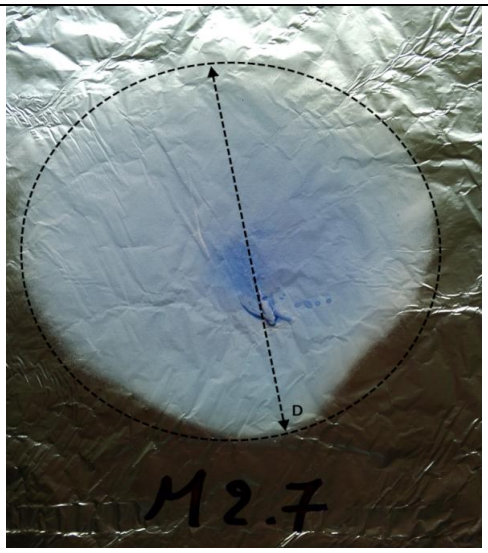
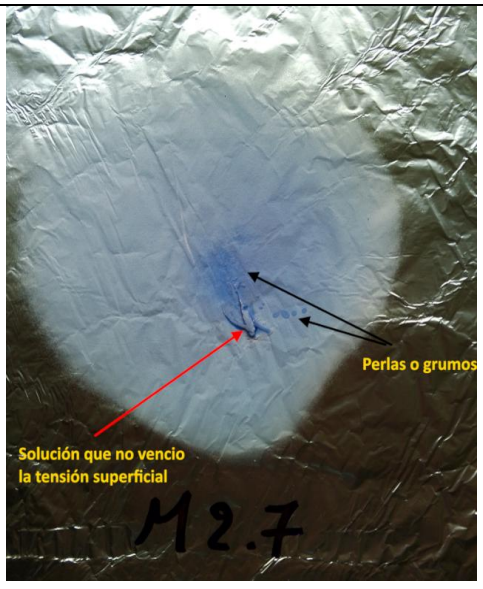
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>15</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.014</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No constante</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td>X</td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td></td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Mediante la inspección visual realizada, esta membrana realizada se la considera aceptable, ya que posee homogeneidad al momento de la formación de las fibras poliméricas.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 23. Ficha técnica electrohilado P16

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 16	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	20/10/2025
Codificación	M2.7
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	6
Distancia aguja-colector (cm)	9.5
Evidencia fotográfica	

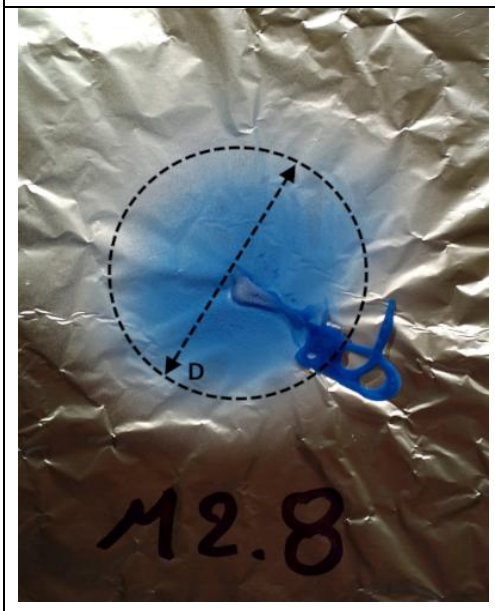
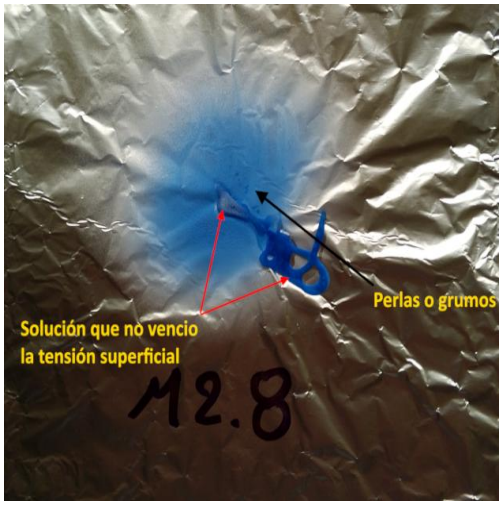
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>13.5</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.020</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Constancia de la estructura</td><td>Constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No constante</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td>X</td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td></td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se puede observar que existe una zona de deposición circular, formada por fibras producidas durante el hilado.
En la zona central se aprecia una mancha, la cual es la aglomeración de la solución depositada, aunque posee de igual manera un capilar que no ha podido vencer la tensión superficial.
Aunque esta membrana posea algunos defectos en su estructura, visualmente se ha aceptado como válida para su análisis posterior.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 24. Ficha técnica electrohilado P17

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 17	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	20/10/2025
Codificación	M2.8
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	6
Distancia aguja-colector (cm)	13.5
Evidencia fotográfica	

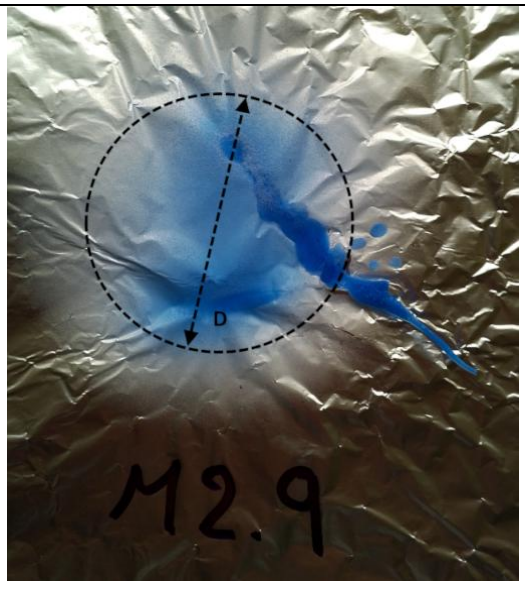
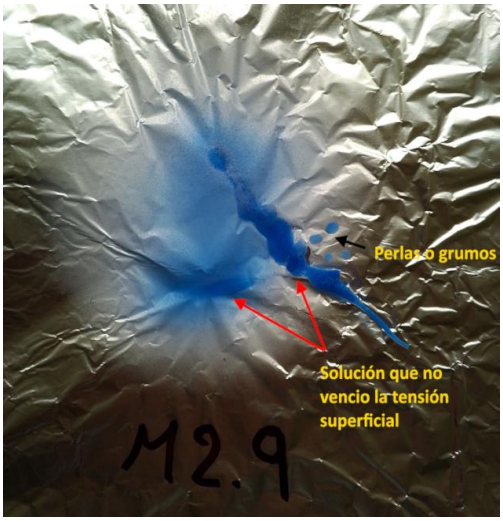
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>5.5</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.021</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Debido a los parámetros utilizados en esta prueba, existe un capilar que se forma a partir de la solución polimérica que no llego a vencer la tensión superficial, depositándose en el colector al alcanzar una cierta longitud.
Se observa que hay formación de fibras durante el proceso, pero la dispersión de las mismas no es adecuada, de tal manera que se aglomeran.
Mediante la inspección visual la membrana de esta prueba ha sido rechazada debido a los defectos estructurales y a que no existe una homogeneidad.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 25. Ficha técnica electrohilado P18

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 18	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	20/10/2025
Codificación	M2.9
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	6
Distancia aguja-colector (cm)	15.5
Evidencia fotográfica	

Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>7</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.013</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se observa que durante esta prueba no existe formación de fibras, al contrario, la solución llega a esparcirse tipo llovizna en el colector.
De igual manera, ya no se da una formación homogénea de la membrana, mirando también que posee defectos estructurales y la formación de un capilar de la solución que no pudo vencer la tensión superficial y se acumula durante el proceso.
Se ha rechazado esta membrana debido a que, no posee homogeneidad en su conformación y por los defectos que esta presenta.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 26. Ficha técnica electrohilado P19

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 19	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	21/10/2025
Codificación	M3.1
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	14
Distancia aguja-colector (cm)	9.5
Evidencia fotográfica	

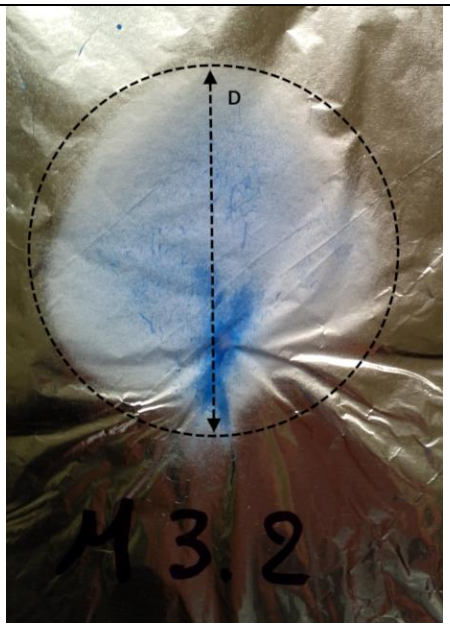
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>6.5</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.032</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se mira que las fibras formadas no poseen continuidad, debido a esto, el área de deposición de la solución es pequeña, aglomerándose en ciertos puntos durante el proceso.
Esta membrana ha sido rechazada a falta de continuidad y homogeneidad, ya que también existe una mayor dispersión no es posible tomarla en cuenta para un análisis.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 27. Ficha técnica electrohilado P21

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

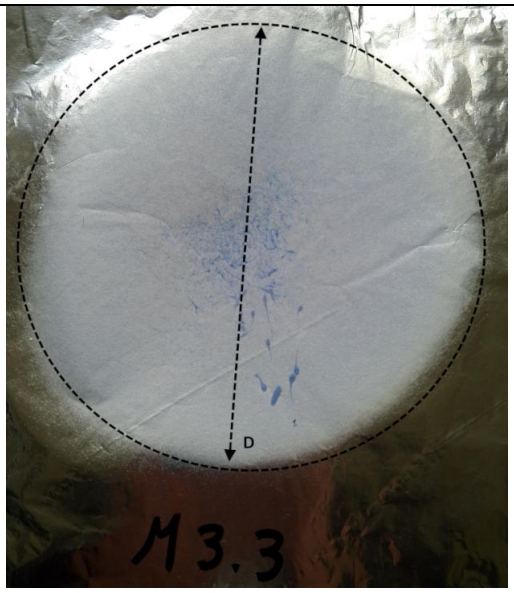
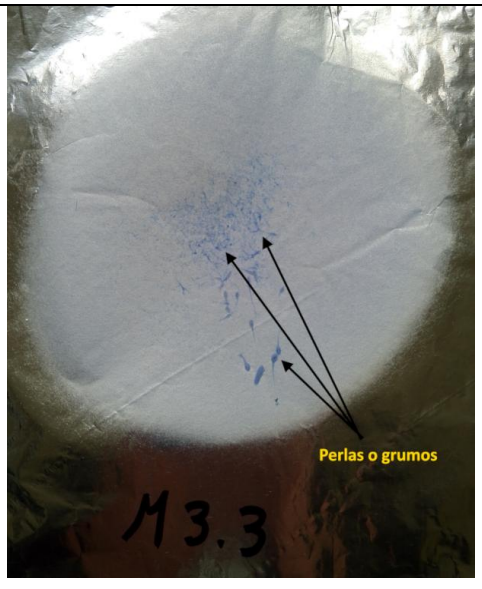
Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 20	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	21/10/2025
Codificación	M3.2
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	14
Distancia aguja-colector (cm)	13.5
Evidencia fotográfica	

Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>10</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.011</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se observa que la distribución de la solución no es uniforme ya que en el centro presenta una acumulación notoria, mientras que alrededor existe un tono más claro indicando una menor deposición.
La mancha azul que se mira, sugiere que durante el proceso la solución llego a gotear sin formar fibras. Indicando también que, se dieron defectos estructurales como perlas o grumos.
Debido a lo mencionado, la membrana producida ha sido rechazada ya que posee muchos defectos de en su estructura y morfología.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 28. Ficha técnica electrohilado P21

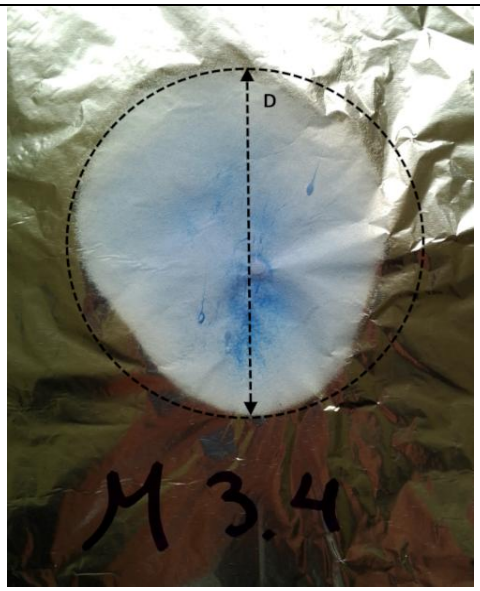
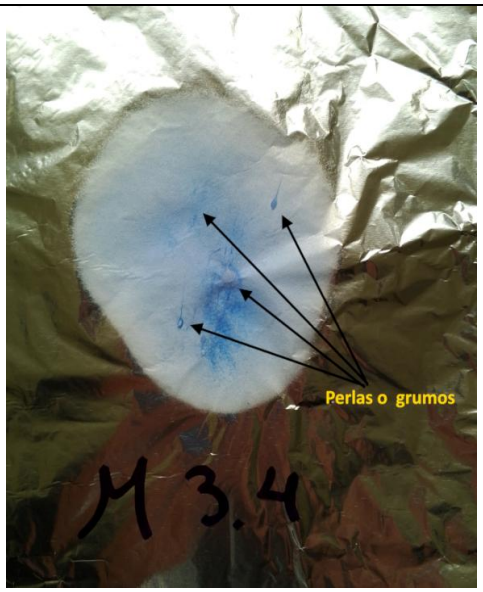
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 21	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	21/10/2025
Codificación	M3.3
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	14
Distancia aguja-colector (cm)	15.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>14.5</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.012</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No constante</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td>X</td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td></td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">En la muestra se puede observar que una buena zona de deposición circular, la cual posee un color uniforme en la mayor parte del área, con lo que, se sugiere que existe una mejor distribución de la solución polimérica.
En el centro se mira ligeras concentraciones de solución que pueden ser un goteo inesperado.
Mediante la inspección visual, la membrana ha sido aceptada, ya que no se aprecian grietas significativas o exceso de acumulación del material.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 29. Ficha técnica electrohilado P22

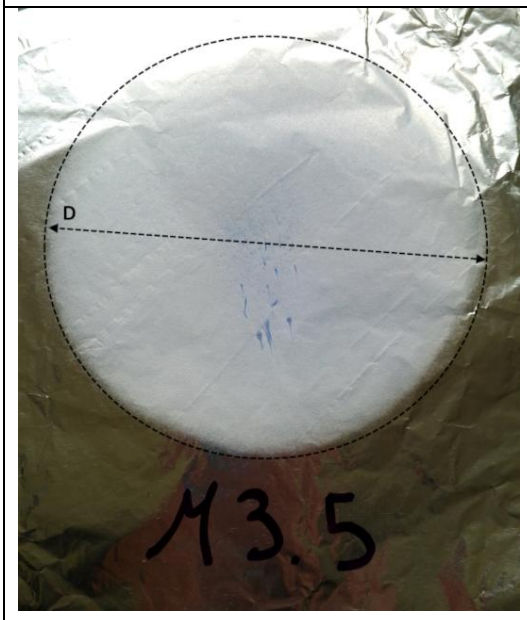
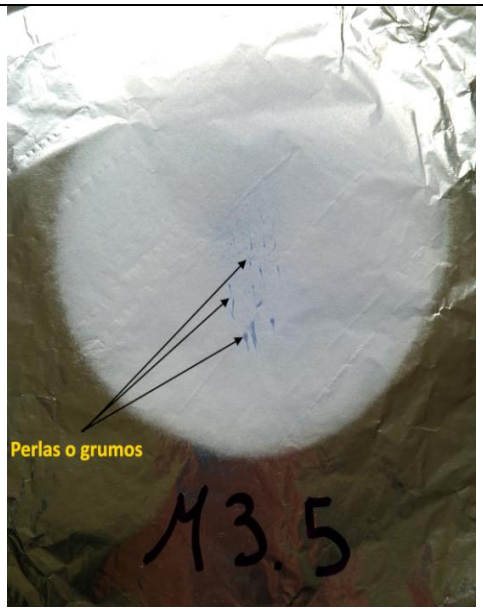
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 22	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	22/10/2025
Codificación	M3.4
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	10
Distancia aguja-colector (cm)	9.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>10</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.010</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No constante</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se observa que la zona de deposición posee una forma ovalada, la cual tiene una coloración azul uniforme, pero en el centro existe una mayor concentración de la solución.
Se distinguen defectos en la estructura como gotas o perlas, evidenciando de esta manera un goteo durante el proceso.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 30. Ficha técnica electrohilado P23

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

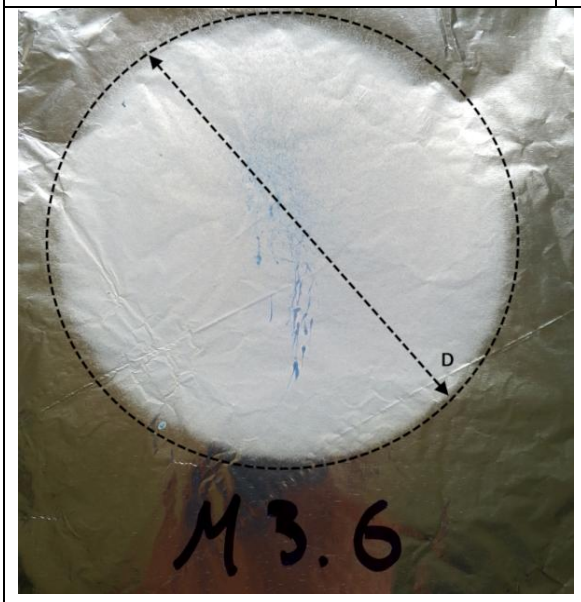
Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 23	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	22/10/2025
Codificación	M3.5
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	10
Distancia aguja-colector (cm)	13.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

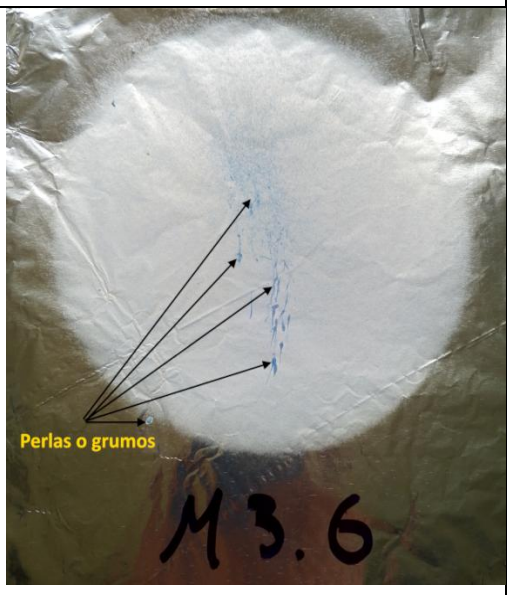
<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>14</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.012</td></tr>
<tr><td rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td colspan="2">Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2">No</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Constancia de la estructura</td><td colspan="2">Constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2">No constante</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Aspecto visual</td><td colspan="2">Aceptado</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2">Rechazado</td><td></td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se observa que la zona de deposición tiene una forma circular simétrica, donde existe un color uniforme y tiene bordes delimitados.
En el centro se pude observar que existió un leve goteo durante el proceso, pero teniendo una dispersión más homogénea.
Esta membrana ha sido aceptada mediante la inspección visual para un análisis posterior, debido que, no posee muchos defectos estructurales, no existe exceso de aglomeración del material y la membrana posee homogeneidad.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 31. Ficha técnica electrohilado P24

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 24	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	22/10/2025
Codificación	M3.6
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	10
Distancia aguja-colector (cm)	15.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**





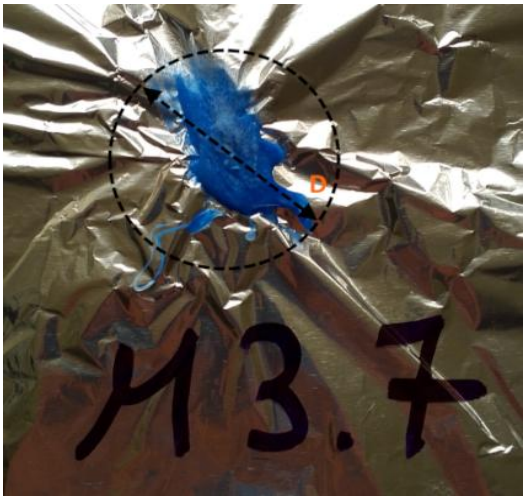
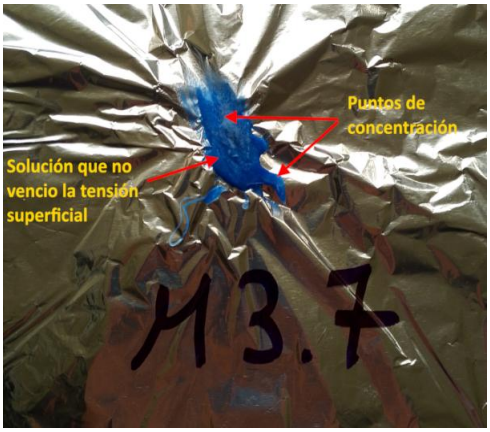
<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>14</td><td>Espesor (µm)</td><td>0.010</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td>X</td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td></td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Se observa que el área de deposición posee una forma circular, donde existe un color uniforme y se da un borde delimitado.
En el centro se observa que existió goteo durante el proceso, aunque este goteo no fue excesivo.
Mediante la inspección visual, esta membrana ha sido aceptada para ser analizada, debido que, no posee muchos defectos estructurales y la membrana es homogénea.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 32. Ficha técnica electrohilado P25

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 25	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	23/10/2025
Codificación	M3.7
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	6
Distancia aguja-colector (cm)	9.5

Evidencia fotográfica

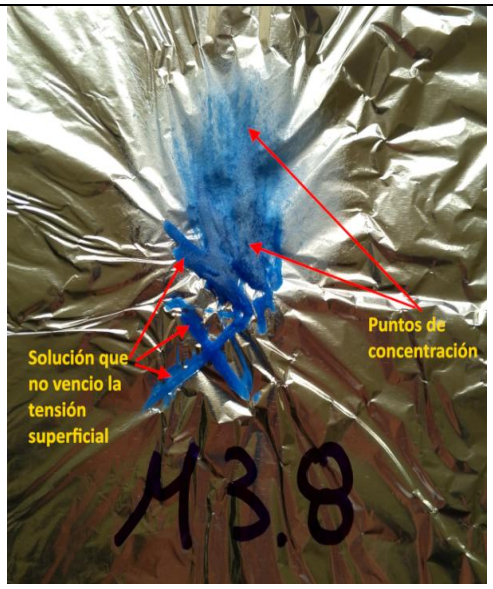
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>5</td><td>Espesor (µm)</td><td>2.511</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">La zona de deposición es muy densa y concentrada, la cual posee un color extenso y la extensión de la superficie es limitada.
La acumulación de la solución es significativa, indicando que se dio una falla en la dispersión del chorro durante el proceso. Se mira que, existe presencia de gotas y una textura irregular.
Visualmente la membrana ha sido rechazada, puesto que no existe uniformidad ni homogeneidad, teniendo una formación deficiente de las fibras poliméricas.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 33. Ficha técnica electrohilado P26

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 26	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	23/10/2025
Codificación	M3.8
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	6
Distancia aguja-colector (cm)	13.5
Evidencia fotográfica	

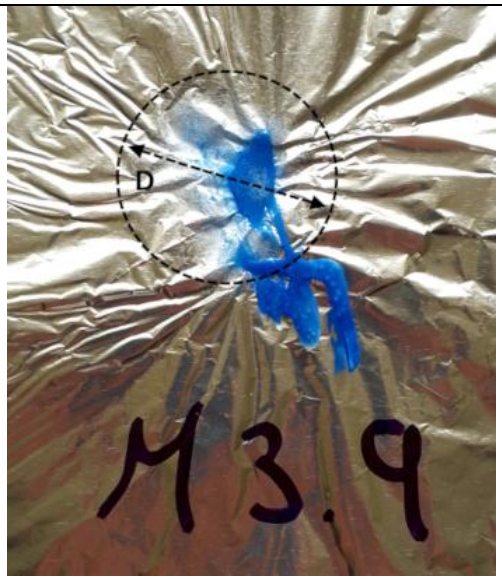
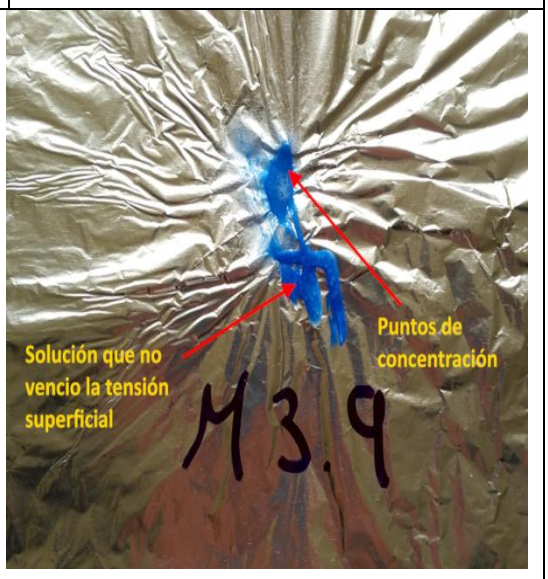
Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>6</td><td>Espesor (µm)</td><td>1.519</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Debido a parámetros erróneos durante el proceso, la solución polimérica no puede llegar a vencer la tensión superficial y realizar el hilado.
Por lo cual, durante el proceso se van formando capilares de solución, que por el peso de la misma se dividen y se deposita en el colector. Conformando de esta manera fallas defectos estructurales.
Esta prueba ha sido rechazada, ya que no existe una formación de fibras uniformes, teniendo también muchos defectos en su estructura denotándola como desechable.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 34. Ficha técnica electrohilado P27

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

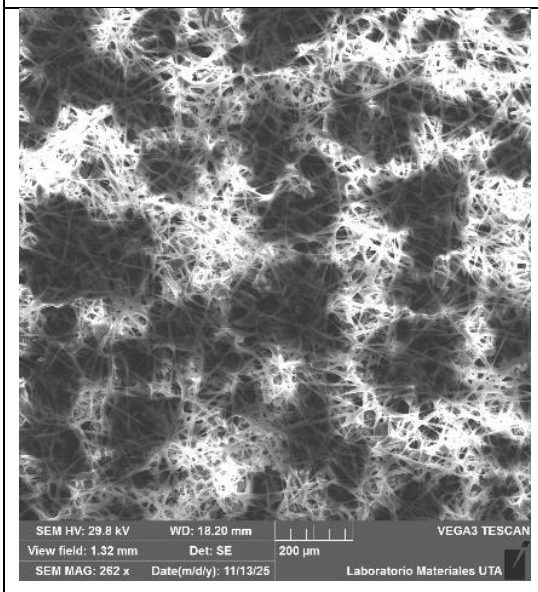
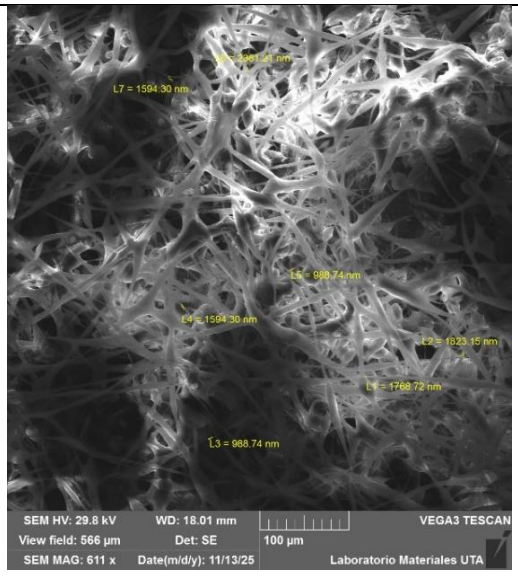
Ficha Técnica de ensayo de electrohilado	
Prueba 27	
Inspección visual de membranas	
Fecha de ejecución	23/10/2025
Codificación	M3.9
Equipo utilizado	Máquina de electrohilado
Realizado por	Diego Guanina
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Neumática, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Voltaje (kV)	6
Distancia aguja-colector (cm)	15.5
Evidencia fotográfica	

Anexo 1	**Anexo 2**
	

<table>
<tr><th colspan="4">Resultados</th></tr>
<tr><td>Diámetro efectivo (cm)</td><td>5</td><td>Espesor (µm)</td><td>1.509</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">No se evidencia la presencia de perlas o grumos</td><td>Si</td><td>X</td></tr>
<tr><td>No</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Formación de membrana</td><td>Constante</td><td></td></tr>
<tr><td>No constante</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Aspecto visual</td><td>Aceptado</td><td></td></tr>
<tr><td>Rechazado</td><td>X</td></tr>
<tr><th colspan="4">Observaciones</th></tr>
<tr><td colspan="4">Debido a que el voltaje es bajo y la distancia entre aguja- colector es grande, la solución polimérica no puede llegar a vencer la tensión superficial para poder realizar el hilado.
Por este motivo, durante el proceso de electrohilado se forma un capilar de solución, el cual sigue aumentando su longitud durante el proceso, hasta llegar a cierta medida y por peso de la misma se corta y se deposita en el colector.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Revisado y Aprobado por:</td><td colspan="2">Ing. Oscar Analuiza, Mg.</td></tr>
</table>

Anexo 35. Ficha técnica de ensayo SEM P1

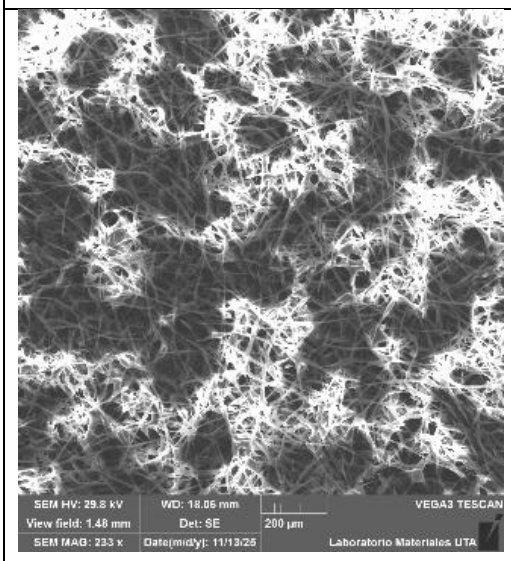
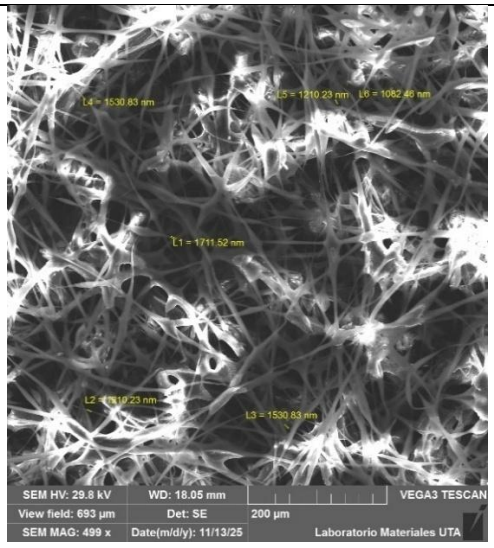
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de Microscopia	
Prueba 1	
Inspección mediante SEM	
Fecha de ejecución	5/11/2025
Realizado por	Diego Guanina
Equipo utilizado	Microscopio Electrónico de Barrido SEM
Técnico encargado	Ing. Cristian Pérez
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Materiales, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Muestra	M2.1
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

Observaciones	
• Se observa una red de fibras continuas con diámetros entre 988 y 2381nm. • Se observa una gran cantidad de grumos depositadas en las fibras producidas. • La distribución es densa, aunque su estructura no es la correcta ya que se busca uniformidad.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 36. Ficha técnica de ensayo SEM P2

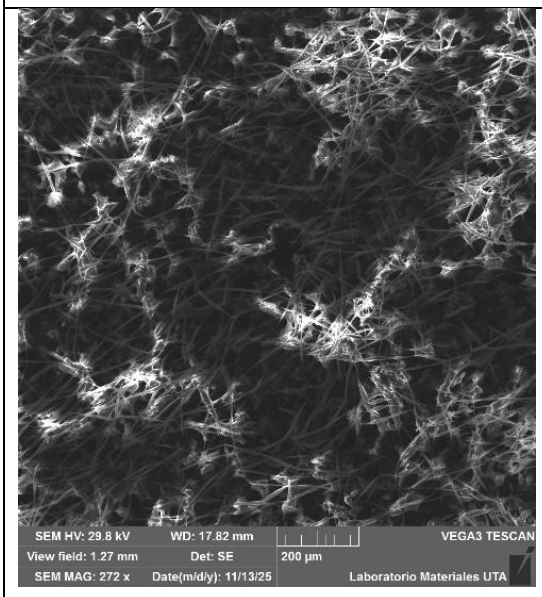
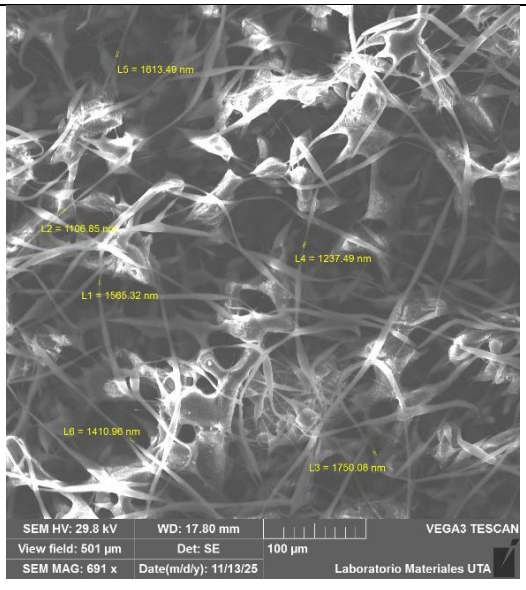
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de Microscopia	
Prueba 2	
Inspección mediante SEM	
Fecha de ejecución	5/11/2025
Realizado por	Diego Guanina
Equipo utilizado	Microscopio Electrónico de Barrido SEM
Técnico encargado	Ing. Cristian Pérez
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Materiales, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Muestra	M2.2
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	
Observaciones	
• Las fibras muestran diámetros entre 1082 y 1711 nm.	

• La red presenta una estructura compacta, se sugiere que el chorro fue estable, pero la concentración del polímero no fue adecuada. • Los defectos en la estructura son visibles, rechazando la muestra.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 37. Ficha técnica de ensayo SEM P3

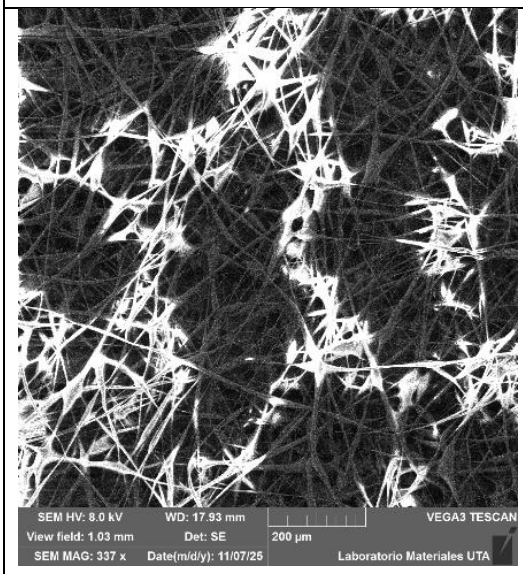
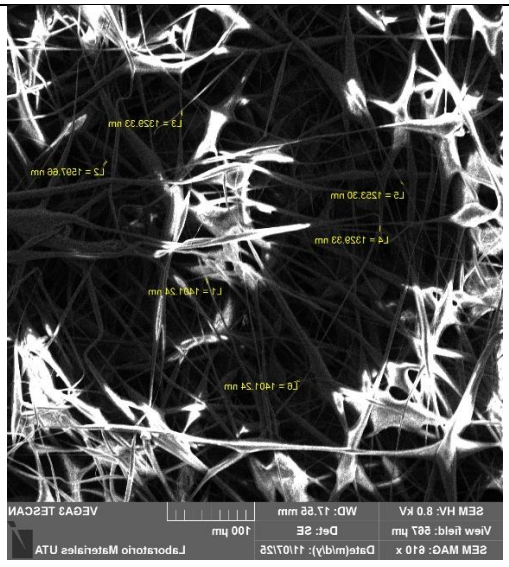
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de Microscopia	
Prueba 3	
Inspección mediante SEM	
Fecha de ejecución	5/11/2025
Realizado por	Diego Guanina
Equipo utilizado	Microscopio Electrónico de Barrido SEM
Técnico encargado	Ing. Cristian Pérez
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Materiales, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Muestra	M2.4
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

Observaciones	
• El rango de medición se encuentra entre 1100 y 1700 nm, observando una mezcla entre fibras delgadas y gruesas. • La morfología de la muestra no es uniforme, presenciando deformaciones en la estructura. • Se evidencia que no hubo estabilidad del cono de Taylor.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 38. Ficha técnica de ensayo SEM P4

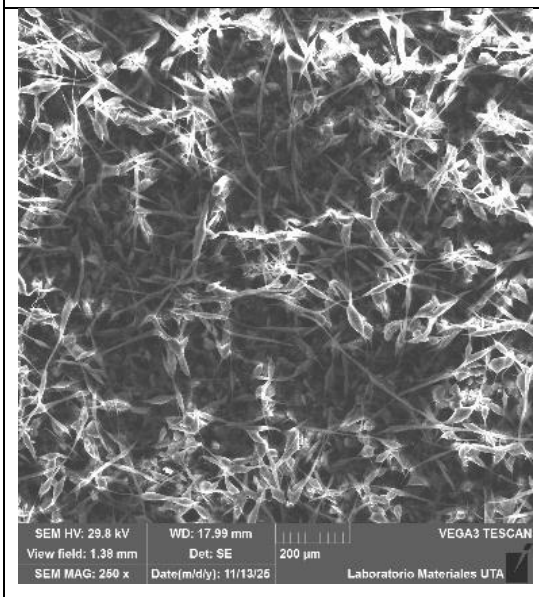
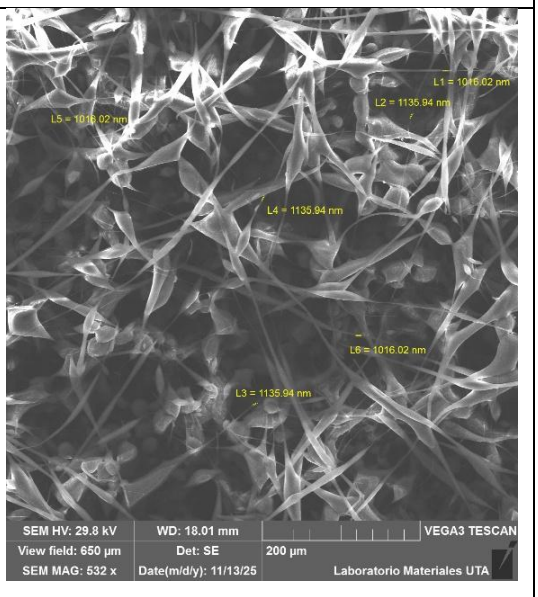
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de Microscopia	
Prueba 4	
Inspección mediante SEM	
Fecha de ejecución	5/11/2025
Realizado por	Diego Guanina
Equipo utilizado	Microscopio Electrónico de Barrido SEM
Técnico encargado	Ing. Cristian Pérez
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Materiales, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Muestra	M2.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	
Observaciones	
• Las fibras muestran diámetros desde 1250 a 1590 nm, evidenciando una leve distribución consistente.	

• La malla polimérica es continua, pero la geometría no es uniforme en la muestra observada. • Se visualizan grumos, indicando la errónea evaporación del solvente antes del depósito.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 39. Ficha técnica de ensayo SEM P5

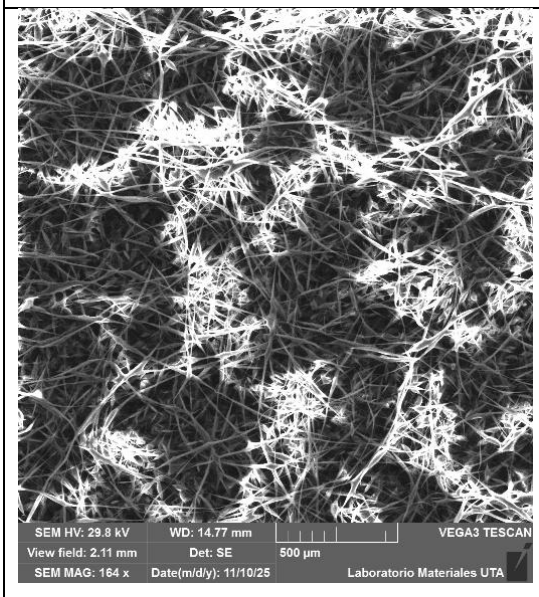
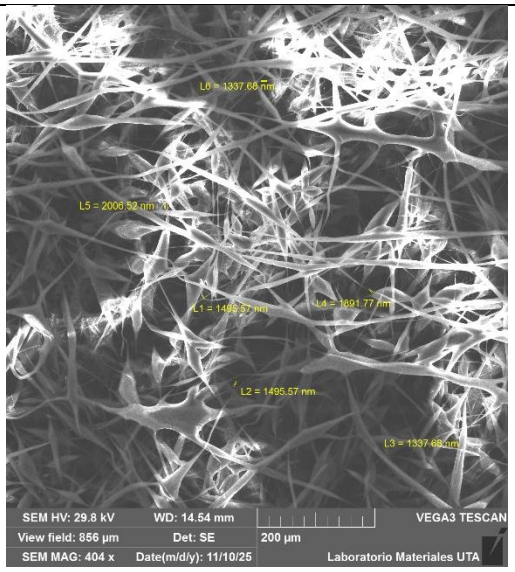
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de Microscopia	
Prueba 5	
Inspección mediante SEM	
Fecha de ejecución	5/11/2025
Realizado por	Diego Guanina
Equipo utilizado	Microscopio Electrónico de Barrido SEM
Técnico encargado	Ing. Cristian Pérez
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Materiales, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Muestra	M2.6
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

Observaciones	
• En esta muestra los diámetros se encuentran entre 1130 y 2000 nm, observando que, no existió estabilidad en el proceso. • La red no es homogénea y los entrecruzamientos son irregulares, notando ciertos puntos de acumulación excesiva de solución. • Se deduce que, las condiciones de voltaje y distancia no fueron las adecuadas para esta solución.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 40. Ficha técnica de ensayo SEM P6

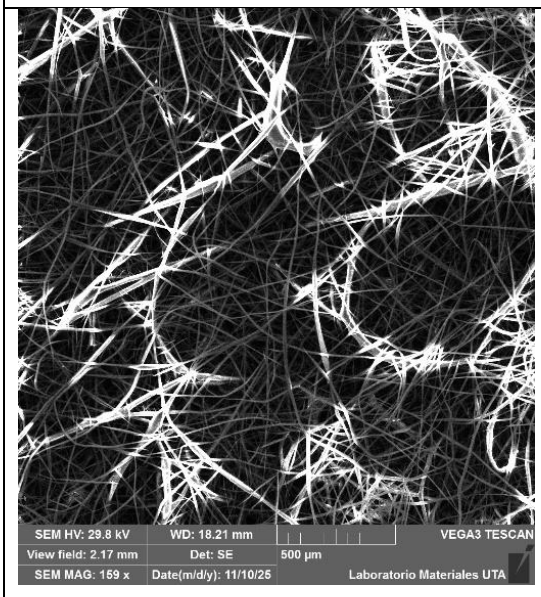
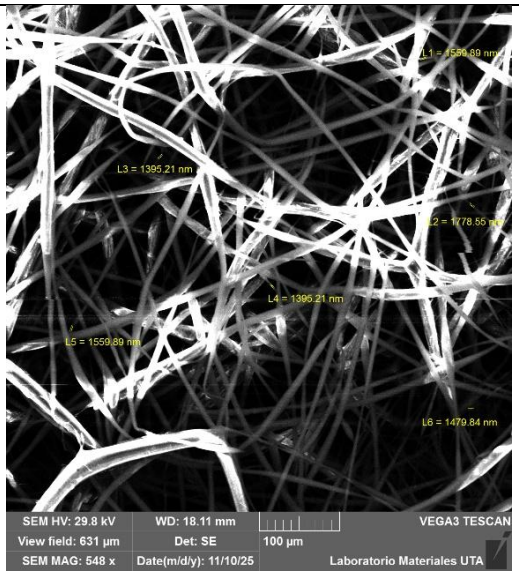
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de Microscopia	
Prueba 6	
Inspección mediante SEM	
Fecha de ejecución	6/11/2025
Realizado por	Diego Guanina
Equipo utilizado	Microscopio Electrónico de Barrido SEM
Técnico encargado	Ing. Cristian Pérez
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Materiales, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Muestra	M2.7
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

Observaciones	
• Se registran medidas desde 1390 a 1800, por lo que se la considera una de las muestras con diámetros más gruesos. • De igual manera, se observa la presencia de grumos, definiendo que estos defectos son a causa de la tensión superficial del material.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 41. Ficha técnica de ensayo SEM P7

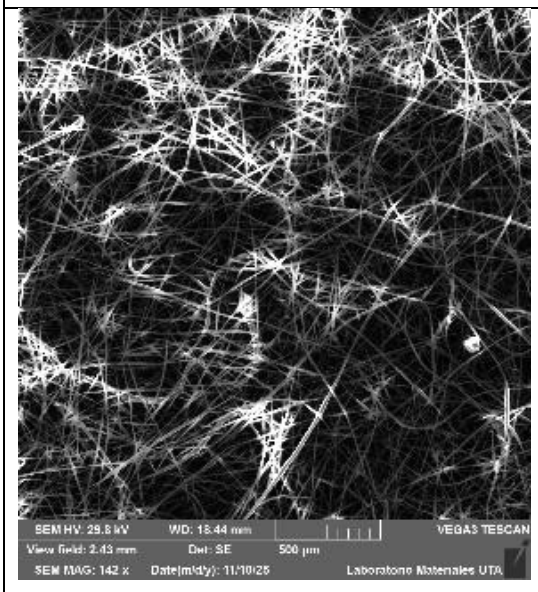
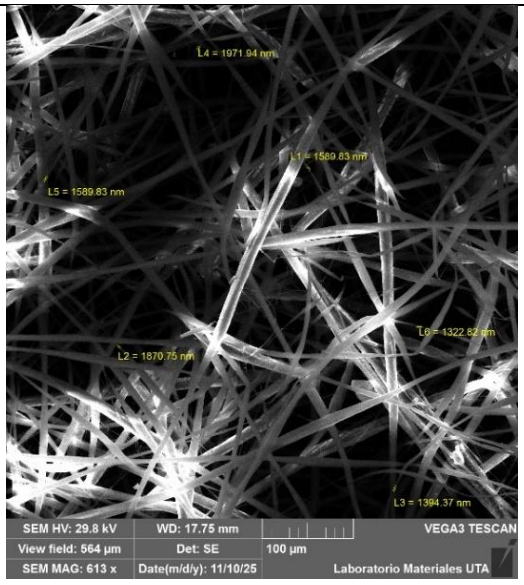
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de Microscopia	
Prueba 7	
Inspección mediante SEM	
Fecha de ejecución	6/11/2025
Realizado por	Diego Guanina
Equipo utilizado	Microscopio Electrónico de Barrido SEM
Técnico encargado	Ing. Cristian Pérez
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Materiales, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Muestra	M3.3
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

Observaciones	
• Las fibras producidas presentan diámetros entre 1300 y 1900 nm, con una buena uniformidad en la mayoría del campo observado. • Posee una red consistente y adecuadamente definida, lo que caracteriza a una concentración más viscosa. • La muestra no presenta defectos como perlas o grumos, los cuales son asociados a la inestabilidad del chorro.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 42. Ficha técnica de ensayo SEM P8

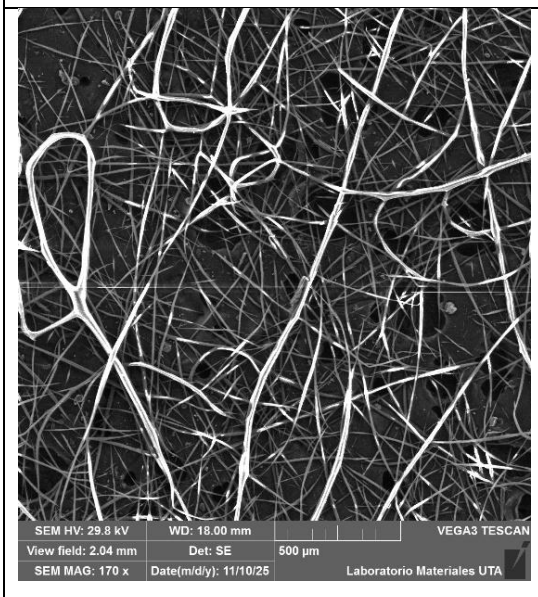
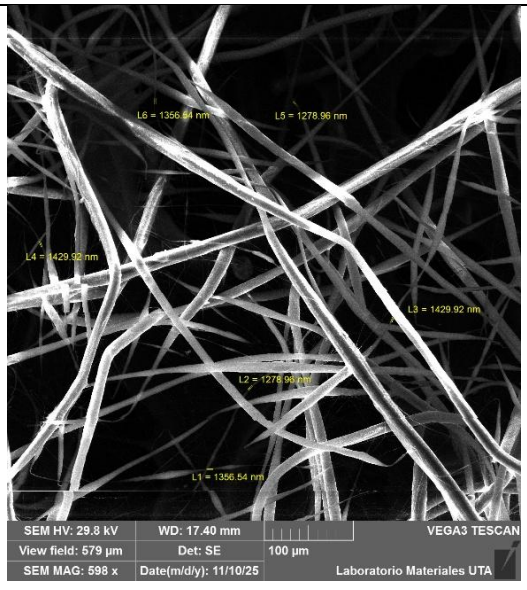
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de Microscopia	
Prueba 8	
Inspección mediante SEM	
Fecha de ejecución	6/11/2025
Realizado por	Diego Guanina
Equipo utilizado	Microscopio Electrónico de Barrido SEM
Técnico encargado	Ing. Cristian Pérez
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Materiales, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Muestra	M3.5
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

Observaciones	
• Se puede examinar medidas desde 1250 a 1450 nm, evidenciando figuras gruesas y uniformes, debido a una solución más concentrada. • El entrecruzamiento de las fibras es abundante, lo que forma una malla densa y bien enlazada. • La morfología tiene una buena calidad, ya que, no se observan acumulaciones ni fracturas.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 43. Ficha técnica de ensayo SEM P9

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

Ficha Técnica de ensayo de Microscopia	
Prueba 9	
Inspección mediante SEM	
Fecha de ejecución	6/11/2025
Realizado por	Diego Guanina
Equipo utilizado	Microscopio Electrónico de Barrido SEM
Técnico encargado	Ing. Cristian Pérez
Revisado por	Ing. Oscar Analuiza, Mg.
Lugar de ensayo	Laboratorio de Materiales, Universidad Técnica de Ambato
Parámetros del ensayo	
Muestra	M3.6
Evidencia fotográfica	
Anexo 1	**Anexo 2**
	

Observaciones	
• Presentan fibras entre 1250 y 1450, aunque el patrón posee distribución no tiene uniformidad a lo largo de la muestra. • La estructura es compacta, pero no continua, demostrando que las existen fallos en las condiciones del proceso. • No existe perlas, grumos, pero si hay interrupciones, por lo que se concluye que el procedimiento es inestable.	
Revisado y Aprobado por:	Ing. Oscar Analuiza, Mg.

Anexo 44. Cálculos método ANOVA

Muestra	Factor A Voltaje (kV)	Factor B Distancia aguja-colector	Diámetro promedio (nm)
M2.1	14	9,5	1590,81
M2.2	14	13,5	1397,35
M2.4	10	9,5	1423,83
M2.5	10	13,5	1385,35
M2.6	10	15,5	1075,98
M2.7	6	9,5	1594,13
M3.3	14	15,5	1528
M3.5	10	13,5	1623,2
M3.6	10	15,5	1355,1
Promedio general		$\bar{Y}$	1441,53

Suma de cuadrados total SST	
M2.1	22285,18
M2.2	1951,68
M2.4	313,21
M2.5	3155,94
M2.6	133625,18
M2.7	23287,44
M3.3	7477,45
M3.5	33004,80
M3.6	7469,76
SST	232570,63

Suma de cuadrados por factor A (Voltaje)		Suma de cuadrados por factor B (Distancia aguja-colector)	
$\bar{Y}_{6}$	1594,13	$\bar{Y}_{9.5}$	1536,26
$\bar{Y}_{10}$	1372,69	$\bar{Y}_{13.5}$	1468,63
$\bar{Y}_{14}$	1505,39	$\bar{Y}_{15.5}$	1319,69
SSA	59213,13	**SSB**	73655,72
Suma de cuadrados residual			
SSE			99701,78

Cuadrados medios	
MSA	29606,57
MSB	36827,86
MSE	24925,45

Estadístico para cada factor	
FA	1,19
FB	1,48

Anexo 45. Cálculos método Taguchi

Muestra	Señal ruido (S/N) (dB)	Resultados del Factor A		Resultados del Factor B		Resultados del Factor C	
M2.1	-64,42	μ_{M2}	1411,2	μ_{10}	1372,69	$\mu_{9.5}$	1536,26
M2.2	-62,91	μ_{M3}	1502,1	μ_{14}	1505,39	$\mu_{13.5}$	1468,63
M2.4	-63,16					$\mu_{15.5}$	1319,69
M2.5	-62,86						
M2.6	-60,65						
M2.7	-64,17						
M3.3	-63,71						
M3.5	-64,3						
M3.6	-62,65						